



**Universidade de  
Aveiro  
2008**

Departamento de Engenharia Mecânica

**Hugo José Santana  
Macedo**

**Projecto mecânico de um fotobiorreactor para  
crescimento de biomassa**





**Universidade de  
Aveiro  
2008**

Departamento de Engenharia Mecânica

**Hugo José Santana  
Macedo**

**Projecto mecânico de um fotobiorreactor para  
crescimento de biomassa**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Eduardo Gil Simões dos Santos Cabral, Professor Auxiliar convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.



Dedico este trabalho aos meus pais, irmãos e avós.

*"O uso de óleos vegetais pode parecer insignificante hoje mas estes produtos a seu tempo tornar-se-ão tão importantes como o querosene e o carvão de hoje."  
(Rudolf Diesel, 1912)*



## **o júri**

Presidente

**Professor Doutor José Joaquim de Almeida Grácio**

Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

**Professora Doutora Maria Paula Polónia Gonçalves**

Professora Associada do Departamento de Biologia da Universidade de Aveiro

Arguente

**Professor Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo**

Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Orientador

**Professor Doutor Eduardo Gil Simões dos Santos Cabral**

Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro





## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, o Professor Doutor Eduardo Gil Simões dos Santos Cabral, pela orientação científica, apoio, e confiança depositada ao longo desta dissertação.

Ao professor Doutor José Joaquim de Almeida Grácio pela boa disposição e bom ambiente proporcionados nas visitas ao laboratório.

Ao Paulo Neves pela, dedicação e disponibilidade ao longo deste trabalho.

Aos meus amigos Pedro Lima e Gilberto Botelho, pelo apoio, disponibilidade e amizade.

Aos colegas e amigos do laboratório de Tribologia e Engenharia de Superfícies, pela amizade, camaradagem e bom ambiente proporcionados.

Aos meus familiares, amigos e namorada pela compreensão e apoio nos últimos meses.

A todos aqueles, que não mencionados nesta lista, contribuíram para este trabalho.

A todos eles os meus sinceros agradecimentos.



## Palavras-chave

Fotobiorreactor, Biocombustível, Microalgas, Biodiesel, *Scale-up*

## Resumo

Este trabalho visou a elaboração do projecto de construção mecânica dum protótipo de um fotobiorreactor que permita a cultura de microalgas num meio artificial controlado, de forma a obter biomassa com elevado teor de lípidos para posterior extracção do óleo.

Numa primeira fase deste trabalho consistiu no estudo das actuais estratégias e tecnologias utilizadas para cultura de microalgas. De forma a definir a linha de projecto.

Posteriormente foi elaborado o projecto e dimensionamento final do fotobiorreactor, apresentando soluções mecânicas de forma a melhorar as actuais dificuldades técnicas associadas a este tipo de culturas

Por fim realizou-se uma análise energética e análise de um possível *scale-up* para esta tecnologia de produção biomassa de microalgas.



**Keywords**

Photobioreactor, Biofuel, Microalgae, Biodiesel, Scale-up

**Abstract**

This work aimed at drafting the mechanical construction of a photobioreactor prototype to allow the cultivation of microalgae in a controlled artificial medium, in order to obtain biomass with high fat content for subsequent extraction of oil for production of biodiesel.

The first phase of this work was the study of existing strategies and technologies used for cultivation of microalgae. In order to define the line of project.

Subsequently was prepared the project and final design of fotobiorreactor, presenting mechanical solutions to improve the current technical difficulties associated with this type of cultures.

Finally we did an energy and scale-up analysis of this technology of biomass production of microalgae.



# Índice

<i>Índice.....</i>	<i>i</i>
<i>Lista de Figuras .....</i>	<i>iii</i>
<i>Lista de Tabelas .....</i>	<i>v</i>
<i>Lista de Símbolos e Abreviações .....</i>	<i>vi</i>
<i>Introdução.....</i>	<i>1</i>
<i>Capítulo I .....</i>	<i>7</i>
<i>1. Microalgas como matéria-prima para produção de biodiesel. ....</i>	<i>7</i>
<i>1.1. A eficiência fotossintética.....</i>	<i>9</i>
<i>1.2. Produção de microalgas .....</i>	<i>11</i>
<i>1.3. Tipos de cultura de algas.....</i>	<i>12</i>
<i>1.3.1. Sistemas de cultura de microalgas “abertos” .....</i>	<i>13</i>
<i>1.3.2. Sistemas de cultura de microalgas “fechados” (fotobiorreactores) .....</i>	<i>14</i>
<i>1.3.3. Limitações tecnológicas e oportunidades de melhoramento.....</i>	<i>19</i>
<i>Capítulo II.....</i>	<i>21</i>
<i>2. Procedimento experimental – Projecto do Fotobiorreactor.....</i>	<i>21</i>
<i>2.1. Requisitos para dimensionamento do fotobiorreactor .....</i>	<i>21</i>
<i>2.2. Dimensionamento do reactor .....</i>	<i>22</i>
<i>2.3. Esterilização/desinfecção do FBR .....</i>	<i>23</i>
<i>2.4. Soluções mecânicas e materiais .....</i>	<i>23</i>
<i>2.4.1. Metais e Ligas Metálicas .....</i>	<i>24</i>
<i>2.4.2. Polímeros .....</i>	<i>28</i>
<i>2.4.2.1. Acrílico .....</i>	<i>28</i>
<i>2.4.2.2. PVC .....</i>	<i>33</i>
<i>2.4.2.3. Nitilo, Viton e Teflon .....</i>	<i>34</i>
<i>2.5. Modelação e Simulação.....</i>	<i>34</i>
<i>2.6. Eficiência do processo (Q) .....</i>	<i>35</i>
<i>2.7. Percurso solar .....</i>	<i>36</i>
<i>Capítulo III .....</i>	<i>39</i>
<i>3. Projecto do fotobiorreactor .....</i>	<i>39</i>
<i>3.1. Projecto mecânico.....</i>	<i>41</i>

3.1.1.	<i>Câmara de cultura</i> .....	41
3.1.1.1.	<i>Juntas Coladas</i> .....	44
3.1.1.2.	<i>Juntas Aparafusadas</i> .....	47
3.1.2.	<i>Mecanismo de Agitação</i> .....	50
3.1.2.1.	<i>Cálculo da potência de accionamento</i> .....	51
3.1.2.2.	<i>Design e selecção de componentes</i> .....	52
3.1.2.3.	<i>Análise estrutural</i> .....	53
3.1.3.	<i>Parte superior da coluna</i> .....	56
3.1.4.	<i>Iluminação</i> .....	57
3.2.	<i>Análise energética</i> .....	59
3.3.	<i>Scale-up</i> .....	64
	<i>Capítulo IV</i> .....	73
4.	<i>Conclusões gerais</i> .....	73
4.1.	<i>Trabalhos Futuros</i> .....	74
	<i>Bibliografia e Referências</i> .....	77
5.	<i>Anexos</i> .....	85



## ***Lista de Figuras***

Fig. 1 – 1º veículo Ford, 1896. ....	2
Fig. 2 – Motor Diesel monocilíndrico, 1906. ....	2
Fig. 3 – Produção Mundial de Biodiesel. ....	3
Fig. 4 – Diagrama do processo de produção de biomassa a partir de microalgas. ....	12
Fig. 5 – Tipos de cultura de microalgas: a) - Sistema aberto localizado no Havai, propriedade da Cyanotech Corp; b) - Fotobiorreactor vertical propriedade da Bioking, Holanda. ....	13
Fig. 6 – Diagrama representativo dos vários tipos de fotobiorreactores fechados existentes. ....	15
Fig. 7 – Fotobiorreactores de mangas no exterior da central eléctrica de Redhawk, perto de Phoenix (EUA), propriedade da GreenFuel. ....	16
Fig. 8 – Fotobiorreactor tubular horizontal. ....	16
Fig. 9 – Esquema de configurações de fotobiorreactores de coluna de bolhas e <i>airlift</i> . ....	17
Fig. 10 – Fotobiorreactor vertical da Universidade de Alicante, Espanha. ....	17
Fig. 11 – Esquema de um fotobiorreactor tubular em $\alpha$ . ....	18
Fig. 12 – Espectro de transmissão UV, Visível, I.R, em acrílicos de 3, 5 e 10 mm de espessura. ....	31
Fig. 13 – Variação da transmissão luminosa de vários materiais em função do tempo de exposição à intempérie . ....	32
Fig. 14 – Variação do índice de amarelecimento de vários materiais em função do tempo de exposição à intempérie . ....	32
Fig. 15 – Ângulos de posicionamento solar. ....	36
Fig. 16 – Aspecto geral da coluna desenvolvida. ....	39
Fig. 17 – Projecto do fotobiorreactor desenvolvido. ....	40
Fig. 18 – Conjunto base, tubo exterior, tubo interior e junta superior de uma coluna. ....	41
Fig. 19 – Pontos de fixação e o local de aplicação de carga na simulação da base. ....	42
Fig. 20 – Campo de tensões equivalentes de Von Mises da base. ....	43
Fig. 21 – Campo de deslocamentos da base. ....	43
Fig. 22 – Junta superior. ....	44
Fig. 23 – Geometria da junta a colar. ....	45
Fig. 24 – Critério para o dimensionamento de juntas de sobreposição dupla ao corte . ....	46
Fig. 25 – Esquema do tipo de junta a dimensionar. ....	47

Fig. 26 - Assemblagem Base, Tubo acrílico exterior, Ligação superior, tubo interior e sistema de agitação.....	51
Fig. 27 – Mecanismo de agitação projectado.....	52
Fig. 28 – Representação do binário exercido nas pás. ....	54
Fig. 29 – a) Pontos de fixação e aplicação de carga, b) campo de deslocamentos. ....	55
Fig. 30 – a) Campo das tensões equivalentes de Von Mises, b) Pormenor da zona mais afectada.....	56
Fig. 31 – Parte superior da coluna.....	57
Fig. 32 – Fotobiorreactor colunas verticais com sistema de iluminação artificial. ....	58
Fig. 33 – Fotobiorreactor com colunas inclinadas para melhor aproveitamento da luz natural.....	58
Fig. 35 - Balanço energético, para $Q=6\%$ apenas com iluminação natural. ....	63
Fig. 36 – Vista de topo da célula de colunas na configuração vertical. ....	68
Fig. 37 – Vista de topo da célula de colunas na configuração inclinada.....	69
Fig. 38 – <i>Layouts</i> sugeridos para a configuração vertical (a) e para a configuração inclinada (b).....	70

## ***Lista de Tabelas***

Tabela 1 – Características do uso do biodiesel em alguns países.....	4
Tabela 2 – Comparação entre algumas fontes de biodiesel.....	8
Tabela 3 – Teor em óleo atribuído a algumas microalgas.....	8
Tabela 4 – Constituintes celulares e poder calorífico de diferentes espécies de <i>Chlorella</i> cultivadas em meio completo e meio deficiente em azoto .....	9
Tabela 5 – Principais características dos reactores de concepção fechada.....	19
Tabela 6 – Possíveis soluções para as algumas limitações dos fotobiorreactores tubulares. ....	19
Tabela 7 - Selecção de um aço inoxidável para um dado meio corrosivo .....	25
Tabela 8 – Composição química e propriedades mecânicas e físicas dos aços AISI 316/L ... ..	27
Tabela 9 – Propriedades do Acrílico (valores indicativos).....	29
Tabela 10 – Propriedades do Nitrilo, Viton e Teflon . ....	34
Tabela 11 – Factores que afectam a eficiência da conversão de energia. ....	36
Tabela 12 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2021. ....	45
Tabela 13 – Vários cenários do conteúdo de lípidos e poder calorífico da espécie <i>Chlorella vulgaris</i> .....	59
Tabela 14 – Cálculo para o $F_{\text{biológico}}$ e $F$ do fotobiorreactor projectado para as várias eficiências ( $Q$ ) consideradas.....	60
Tabela 15 – Cenários seleccionados para a simulação.....	65
Tabela 16 – Sombreamento na configuração vertical. ....	66
Tabela 17 – Sombreamento na configuração inclinada.....	67
Tabela 18 – Quantidade de óleo extraído no período de funcionamento considerado, para o cenário de $Q=6\%$ , com variação do teor de lípidos.....	71
Tabela 19 – Produção de óleo anual (l/ha.ano) .....	71

## ***Lista de Símbolos e Abreviações***

$(\text{CH}_2\text{O})_n$  – hidrato de carbono

$\text{CO}_2$  – dióxido de carbono

$E_B$  – energia química da biomassa (KJ)

$E_{\text{PAR}}$  – energia luminosa (KJ)

EUA – Estados Unidos da América

FBR - fotobiorreactor

$F_{\text{vol}}$  – fluxo de fotões absorvido por volume de biomassa ( $\mu\text{E}/\text{m}^3\cdot\text{s}$ )

$\text{H}_2\text{O}$  – água

$h\nu$  – energia de um fotão

NREL - *National Renewable Energy Laboratory dos EUA*

$\text{O}_2$  – oxigénio gasoso

PAR - do inglês *photosynthetic active radiation*, radiação fotossinteticamente activa.

$P_{\text{cb}}$  – poder calorífico da biomassa (KJ/g)

$Q$  – eficiência energética do processo fotossíntese (%)

$Q_{\text{Biológico}}$  – eficiência dependente de factores biológicos (%)

$Q_{\text{teo}}$  – eficiência fotossintética máxima teórica (~27%)

$Q_{\text{Tecnológico}}$  – eficiência dependente de factores tecnológicos (%)

## **Introdução**

As alterações climáticas são cada vez mais evidentes, grande parte devido ao crescente consumo global de energia fóssil ao longo dos últimos 2 séculos. A progressiva diminuição das reservas mundiais, a especulação, as economias emergentes têm contribuído para o aumento do preço do petróleo. Uma das soluções para este grave problema passa pelo desenvolvimento de combustíveis renováveis que permitam reduzir a dependência da sociedade perante os combustíveis fósseis <sup>[1]</sup>. Desta forma, a corrida ao desenvolvimento de biocombustíveis como fonte de energia alternativa renovável, é já, uma realidade bem presente nos nossos dias, estando patente um enorme esforço por parte das agências governamentais, das quais se destaca os Departamentos de Energia da União Europeia e dos Estados Unidos, bem como o envolvimento activo de várias empresas e estabelecimentos de ensino superior nacionais e internacionais.

Os biocombustíveis são considerados quaisquer combustíveis de origem biológica, que não seja fóssil, apresentando-se por isso como uma fonte de energia renovável. Uma energia renovável é uma energia que é reposta naturalmente a uma taxa igual ou superior à do seu consumo <sup>[1]</sup>.

Os biocombustíveis podem ser usados como combustíveis isoladamente ou ser misturados com os combustíveis convencionais. Os exemplos mais comuns nesta categoria são o biodiesel e o bioetanol.

Os biocombustíveis não são novidade da actualidade, há um século atrás, o primeiro automóvel de Henry Ford funcionava a álcool (Fig. 1), enquanto que Rudolf Diesel alimentava o motor baptizado com o seu nome a óleo de amendoim (Fig. 2). Em breve os dois inventores descobriram que o “óleo de rocha” (*petra oleum* – petróleo), quando refinado, proporcionava muito mais energia por litro que o álcool ou o óleo vegetal e, além disso era barato. Iniciou-se assim a era do petróleo <sup>[2]</sup>.



**Fig. 1 – 1º veículo Ford, 1896<sup>[3]</sup>.**



**Fig. 2 – Motor Diesel monocilíndrico, 1906<sup>[4]</sup>.**

Sendo vários os biocombustíveis actualmente em desenvolvimento, nesta dissertação será dado ênfase ao biodiesel.

O biodiesel é o resultado da transesterificação de óleos e gorduras com álcoois. Esta reacção foi descoberta por E. Duffy e J. Patrik em 1853, muito antes de Rudolf Diesel ter inventado o motor Diesel<sup>[5]</sup>.

O biodiesel é um biocombustível constituído por uma mistura de ésteres (metílicos, etílicos ou propílicos) de alquilo, produzido por esterificação de ácidos gordos, presentes em óleos vegetais ou em gorduras animais, com álcoois (metanol, etanol ou propanol), tendo qualidade para ser utilizado em motores diesel<sup>[6]</sup>.

Apesar de ter sido inicialmente desenvolvido no Brasil, o principal mercado produtor e consumidor de biodiesel é hoje a Europa. Desde a industrialização do biodiesel iniciado na Europa no início dos anos 90, a capacidade de produção não tem parado de aumentar (Fig. 3), A Alemanha é hoje o maior produtor e consumidor mundial de biodiesel, responsável por cerca de 42% da produção mundial, usando quase exclusivamente como matéria-prima a colza<sup>[7]</sup>. O custo de produção do biodiesel alemão de 0,21 €/litro e o seu preço de venda de 1,04 €/litro (dados de 2007)<sup>[2]</sup>.

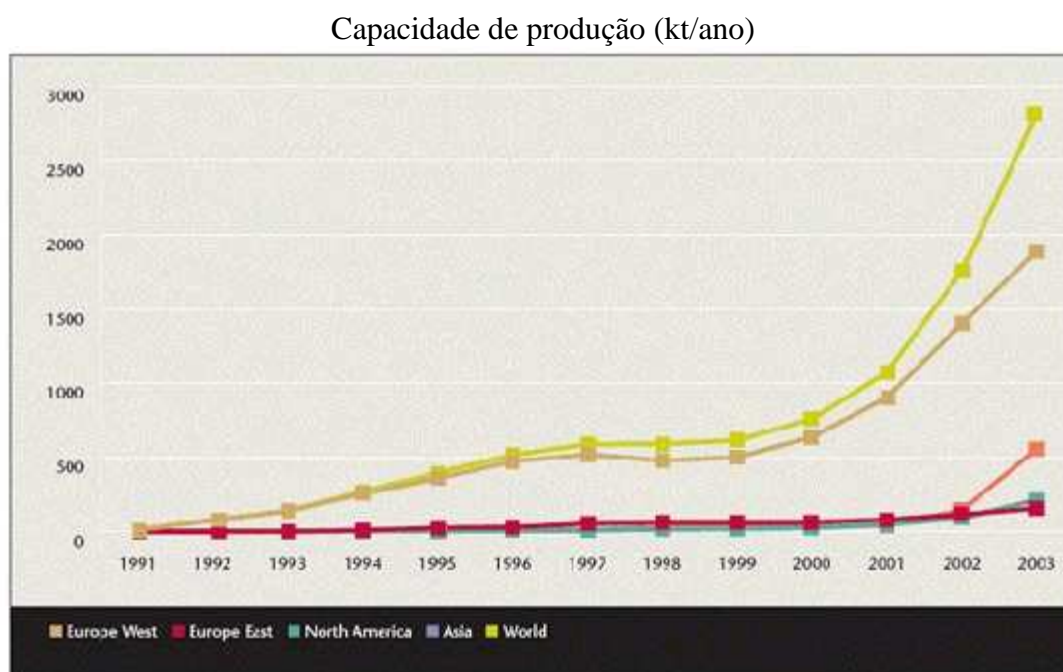


Fig. 3 – Produção Mundial de Biodiesel <sup>[7]</sup>.

A União Europeia produz anualmente mais de 1,35 milhões de toneladas de biodiesel, em cerca de 40 unidades de produção. Isso corresponde a 90% da produção mundial de biodiesel. Os governos garantem incentivos fiscais aos produtores, além de promover leis específicas para o produto, visando melhoria das condições ambientais através da utilização de fontes de energia mais limpas. A tributação dos combustíveis de petróleo na Europa, inclusive do diesel mineral, é extremamente alta, garantindo a competitividade do biodiesel no mercado <sup>[7]</sup>. A Tabela 1 apresenta as características do biodiesel dos três maiores países produtores europeus e dos Estados Unidos.

**Tabela 1 – Características do uso do biodiesel em alguns países <sup>[7]</sup>.**

País	Isenção de impostos	Tipo de biodiesel Comercializado	Matéria-prima	Observações
<b>Alemanha</b>	Completa	Os postos de combustível têm B100 e diesel aditivado (B5)	Colza	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1800 postos de abastecimento</li> <li>- Maior produtor mundial</li> <li>- Mais de 2,5 milhões de veículos aprovados circularem com biocombustível</li> <li>- Biodiesel 12% mais barato que o diesel</li> </ul>
<b>Itália</b>	Parcial (até 200 mil ton/ano)	B100: para indústria e aquecimento residencial B5 e B25: para transporte	Colza e Girassol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 17 produtores de biodiesel</li> </ul>
<b>França</b>	Parcial (até 317 mil ton/ano)	Mais de metade do diesel comercializado leva 5% de biodiesel (B5), já o B30 é mais utilizado em frotas cativas.	Colza e Girassol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 3 grandes produtores de biodiesel</li> <li>- Das 13 refinarias existentes 7 misturam 5% de biodiesel ao diesel.</li> <li>- 4 mil veículos utilizam o biodiesel em mistura, dos quais, mais de metade usam B30</li> </ul>
<b>Estados Unidos</b>	Incentivos federais, além das taxas específicas para cada estado.	B20 (mais comum), B2 (usado por agricultores, alguns estados obrigam que todo o diesel comercializado contenha 2% de biodiesel) e B100 (pouco usado)	Soja e óleo residual de fritura	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Actualmente usado nos transportes públicos, correios e órgãos do governo</li> <li>- 53 fábricas de biodiesel (capacidade de 1,18 milhões de ton/ano)</li> <li>- Programa é baseado em pequenos produtores</li> </ul>

A produção de biodiesel pode ser realizado localmente, baseada na produção agrícola local, o que poderá servir como estímulo para economias rurais decadentes, e reduzir a dependência externa em combustíveis, mas o seu impacto no ambiente é converso <sup>[10][5]</sup>. O uso de biocombustíveis ajuda a controlar o nível de carbono na atmosfera uma vez que o carbono libertado pela queima destes combustíveis provém da atmosfera, tendo sido capturado pelas plantas durante o processo de fotossíntese, no entanto a cultura intensiva de matéria-prima para produzir este tipo de combustível exige elevadas doses de pesticidas e adubos azotados, aplicados em áreas de cultura extensas, causando erosão no solo <sup>[10]</sup>.

Os biocombustíveis comercializados actualmente consomem produtos agrícolas que poderiam servir para alimentar um planeta faminto. Segundo a ONU, embora proporcionando potenciais vantagens, o crescimento explosivo dos biocombustíveis poderá enfraquecer a segurança alimentar e aumentar os preços dos alimentos num mundo onde 25 mil pessoas morrem de fome todos os dias e, a cada cinco segundos, uma criança morre por falta de alimentos <sup>[11]</sup>. Nas próximas décadas, as alterações climáticas podem vir a prejudicar a produtividade agrícola mundial, reduzindo a matéria-prima disponível <sup>[2]</sup>.



A produção de biocombustíveis surge no âmbito de reduzir a actual dependência dos combustíveis fósseis, contudo, tanto a cultura das matérias-primas usadas como o seu processo de produção consomem combustíveis fósseis. Considerando como exemplo o caso do biodiesel alemão, produzido a partir de colza, é necessário fornecer 1 unidade de energia de combustível fóssil para produzir 2,5 unidades de energia de biodiesel <sup>[2]</sup>.

Analisando os factos descritos relativamente à produção actual de biodiesel, podemos concluir que o principal problema reside no facto da matéria-prima ser proveniente de culturas agrícolas alimentares. Uma solução possível para este problema é a produção de combustível a partir de culturas não alimentares. Esforços desenvolvidos apontam as microalgas como sendo a matéria-prima mais promissora, no entanto os actuais custos associados à produção de biodiesel de microalgas à escala industrial tornam o processo difícil <sup>[12][13]</sup>. É neste âmbito que surge o tema desta dissertação, de forma a estudar as tecnologias existentes de cultura de microalgas, identificar as suas limitações e com base nessa informação projectar um protótipo de sistema de cultura apto à produção de biomassa de microalgas.

Esta tese encontra-se dividida em quatro capítulos, sendo o primeiro dedicado à revisão bibliográfica, em que se aborda o potencial das microalgas para produção de biodiesel, os requisitos gerais para a sua produção e os actuais métodos e tecnologias de cultura.

No segundo capítulo são abordados os métodos utilizados para projectar um fotobiorreactor para cultura de microalgas e os pressupostos escolhidos para realizar um estudo energético da produção de biomassa a partir do rector projectado.

No terceiro capítulo é apresentado o fotobiorreactor projectado, bem como os resultados da análise energética do processo de produção de óleo a partir de biomassa de microalgas.

Por último, são apresentados no quarto capítulo as conclusões gerais e trabalhos futuros.



## **Capítulo I**

*O objectivo deste capítulo é expor as razões pelas quais as microalgas são consideradas como potencial matéria-prima para a produção de biodiesel e identificar os principais obstáculos técnicos a vencer para a sua produção, tanto em termos biológicos como em termos de tecnologia de cultura.*

### **1. Microalgas como matéria-prima para produção de biodiesel.**

Considera-se “microalga” os organismos fotossintéticos microscópicos que vivem nos meios aquáticos. Essa designação é no entanto de ordem prática e não corresponde aos grupos taxonómicos encontradas em Biologia<sup>[12] [15][17]</sup>. O mecanismo fotossintético das microalgas é comparável ao das plantas terrestres, mas devido à sua estrutura celular simples, e ao meio líquido em que vivem, têm trocas mais eficientes de água, CO<sub>2</sub> e outros nutrientes, levando a taxas elevadas de conversão de energia solar em biomassa<sup>[12][16]</sup>.

O potencial das microalgas para produção de biocombustível é grande. Algumas algas fabricam amido (que pode ser transformado em bioetanol), algumas poderão produzir hidrogénio e outras ainda têm elevados teores de lípidos que podem ser utilizadas para gerar biodiesel<sup>[12][17]</sup>. As algas ao crescerem absorvem o dióxido de carbono, o principal gás responsável pelo efeito de estufa, podendo ser utilizadas para fixar esse carbono<sup>[2][12] [18]</sup>. As microalgas têm elevadas taxas de crescimento e não precisam de grandes áreas de cultura face às outras fontes de origem vegetal. Comparando a potencial produtividade das microalgas com culturas convencionais, constata-se que enquanto um hectare de milho produz cerca de 2500 litros de etanol por ano, um hectare de soja pode produzir cerca de 560 litros de biodiesel/ano, um hectare de algas pode render mais de 45 mil litros de biocombustível por ano<sup>[2][12]</sup>.

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre várias fontes de biodiesel, caracterizando a produção anual de óleo e a área de cultura necessária.

**Tabela 2 – Comparação entre algumas fontes de biodiesel.**  
**Adaptado de Chisty, Y. (2007) <sup>[13]</sup>.**

Cultura	Óleo obtido (l/ha·ano)	Área de cultura (M ha) <sup>a</sup>
Milho	172	1540
Soja	446	594
Colza	1190	223
Pinhão manso ( <i>Jatropha</i> )	1892	140
Coco	2689	99
Palma	5950	45
Microalga <sup>b</sup>	136900	2
Microalga <sup>c</sup>	58700	4,5

<sup>a</sup> Para substituir 50% do combustível gasto em transportes nos EUA.

<sup>b</sup> 70% de óleo em peso seco.

<sup>c</sup> 30% de óleo em peso seco.

Analisando a Tabela 2 podemos constatar que o potencial das microalgas para produção de biocombustível é enorme face à quantidade de óleo obtido relativamente a outras culturas, necessitando de uma área de cultura substancialmente menor para produzir a mesma quantidade de óleo.

Existem mais de 200 mil espécies de algas<sup>[9]</sup>, das quais se conhecem algumas consideradas promissoras para a produção de biodiesel dado o seu elevado teor em lípidos. Na Tabela 3 apresentamos algumas dessas espécies de microalgas.

**Tabela 3 – Teor em óleo atribuído a algumas microalgas.**  
**Adaptado de Chisty, Y. (2007) <sup>[13]</sup>**

Microalga	Teor em lípidos (% peso seco)
<i>Botryococcus braunii</i>	25–75
<i>Chlorella</i> sp.	28–32
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca</i> sp.	16–37
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Isochrysis</i> sp.	25–33
<i>Monallanthus salina</i>	>20
<i>Nannochloris</i> sp.	20–35
<i>Nannochloropsis</i> sp.	31–68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35–54
<i>Nitzschia</i> sp.	45–47
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20–30
<i>Schizochytrium</i> sp.	50–77
<i>Tetraselmis sueica</i>	15–23

As microalgas acumulam os lípidos como reserva energética. O teor em lípidos nas microalgas varia normalmente entre 8 e 35 % <sup>[13][19]</sup>. Esse teor pode aumentar em

algumas espécies de microalgas se as condições de cultura forem modificadas, como por exemplo, reduzindo a concentração dos elementos químicos necessários para o crescimento e divisão das células (azoto, fósforo, silício) <sup>[17]</sup>. Deste modo o teor em lípidos pode aumentar até 2 vezes <sup>[20][21]</sup>. A tabela 4 mostra o resultado de um estudo realizado por Illman et al. em 2000 <sup>[20]</sup> com diferentes variedades da microalga *Chlorella*, cultivadas em meio normal e meio com pouco azoto (N), em que se vê esse aumento em lípidos (Tabela 4).

**Tabela 4 – Constituintes celulares e poder calorífico de diferentes espécies de *Chlorella* cultivadas em meio completo e meio deficiente em azoto <sup>[20]</sup>**

	<i>Chlorella vulgaris</i>		<i>Chlorella emersonii</i>		<i>Chlorella protothecoides</i>		<i>Chlorella minutissima</i>	
	Controlo	Carência N	Controlo	Carência N	Controlo	Carência N	Controlo	Carência N
Proteínas (%)	29 ± 2,5	7 ± 1,6	32 ± 2,9	28 ± 3,8	38 ± 3	36 ± 3	24 ± 3,1	9 ± 2
Glícidos (%)	51 ± 2	55 ± 3,2	41 ± 2,5	11 ± 2,2	52 ± 2,3	41 ± 3	42 ± 3,5	14 ± 2,1
Lípidos (%)	18 ± 2,1	40 ± 2,1	29 ± 2,5	63 ± 1	11 ± 3,2	23 ± 1,2	31 ± 3,2	57 ± 2,5
Poder calorífico (KJ/g)	18 ± 0,7	23 ± 2,1	21 ± 0,7	29 ± 0,7	19 ± 1,6	24 ± 2,0	21 ± 1,2	21 ± 1,0

### 1.1. A eficiência fotossintética

As microalgas são organismos fotossintéticos, isto é, necessitam da energia luminosa para converter o CO<sub>2</sub> em energia química contida nas moléculas biológicas. A luz utilizada situa-se na gama de 400 a 700nm do espectro electromagnético e é designada por radiação fotossintética activa (ou PAR do inglês *photosynthetic active radiation*) <sup>[22][23]</sup>. A PAR corresponde a uma fracção da energia fornecida pelo sol (~45%) e depende da latitude considerada, da hora do dia e da altura do ano e do clima <sup>[99]</sup>. De maneira simplificada, podemos representar a fotossíntese pela seguinte reacção, onde  $h\nu$  é a energia de um fotão da região PAR <sup>[16]</sup>:



Relativamente à fotossíntese é possível calcular o rendimento bioenergético de uma dada cultura de microalgas.

O rendimento bioenergético,  $\Psi$  (%), quantifica a percentagem de energia luminosa que é convertida em energia química, e pode ser calculado como sendo o produto de  $\Psi_{kt}$  (g/KJ) pelo poder calorífico da biomassa,  $Pc_b$  (KJ/g) <sup>[23][24][25]</sup>.

$$\psi = \psi_{kt} \cdot Pc_b \Leftrightarrow Pc_b = \frac{1}{\psi_{kt}} \cdot \psi \quad (2)$$

Multiplicando o  $Pc_b$  pela quantidade de biomassa produzida, temos a energia total na biomassa  $E_B$  (KJ). Esta energia está dependente da energia PAR,  $E_{PAR}$  (KJ) e da eficiência do processo,  $Q$  (%),  $E_{PAR}$  é a quantidade de energia luminosa necessária ( $1/\Psi_{kt}$ ) para produzir uma determinada quantidade de biomassa. Desta forma podemos efectuar o balanço energético através da seguinte relação:

$$E_B = E_{PAR} \times Q \quad (3)$$

Esta relação é importante porque permite avaliar a quantidade de energia “luminosa” que permanece no produto final, no nosso caso, no óleo.

A eficiência fotossintética tem um valor máximo teórico ( $Q_{teo}$ ) de ~27% <sup>[22][12]</sup>. O cálculo desse máximo é feito pela equação 1: produzir uma mole de glicose ( $C_6H_{12}O_6$ ) por fotossíntese requer 2870KJ/mol <sup>[26]</sup>. Pela equação 1, vemos que são necessários 48 moles fotões. A energia média de uma mole de fotões PAR (a 550nm) é calculada pela Lei de Planck e é igual a 216,8KJ/mole.

A eficiência fotossintética ( $Q$ ) de uma dada cultura de microalgas depende de factores biológicos ( $F_{biológico}$ ) como a duração do fotoperíodo, temperatura, disponibilidade dos nutrientes, a densidade celular, etc., e de factores tecnológicos ( $F_{tecnológico}$ ) como a transparência dos materiais, a orientação da cultura em relação ao sol, a eficiência na recolha, secagem da biomassa e na extracção e conversão do óleo em biodiesel. Assim

$$Q = Q_{teo} \times F_{biológico} \times F_{tecnológico} \quad (4)$$

As eficiências fotossintética medidas em culturas de microalgas raramente excedem os 20% (20 % para *Chlorella sp.* <sup>[27][28]</sup>, 21,6 % *Phaeodactylum tricornutum* <sup>[24]</sup>), contudo os valores mais correntes em culturas iluminadas naturalmente rondam os 6% <sup>[40][54]</sup>.

## ***1.2. Produção de microalgas***

A produção de microalgas a nível industrial surge na Alemanha durante a 2ª Grande Guerra, como fonte alimentar dado o seu elevado teor proteico, com vista a superar o défice em alimentos proteicos de origem animal existente na altura. Contudo apesar dos esforços desenvolvidos para optimização deste tipo de cultura nas décadas de 50 e 60 nos EUA e Japão, apenas década 70 é que a sua cultura ganhou relevância, através da produção de pigmentos, suplementos alimentares e vitaminas para a industria farmacêutica <sup>[29]</sup>.

O primeiro passo para explorar tal potencialidade foi dado nos EUA em 1978, pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) e pelo Departamento de Energia através da criação de um programa para desenvolver biodiesel a partir de microalgas, cultivadas em tanques (sistema aberto). O programa ficou conhecido como *Aquatic Species Program*. Contudo o programa é abandonado em 1996 sem atingir o objectivo para o qual foi criado <sup>[17]</sup>.

Apesar dos esforços continuados por parte de outras entidades, o objectivo de produção de biodiesel a partir de microalgas ricas em lípidos, é visto por alguns autores como inviável devido ao seu elevado custo, comprometendo a industrialização do processo <sup>[22]</sup>. Acredita-se no entanto que o objectivo será alcançado mediante o esforço na selecção das espécies de microalgas, na compreensão da sua fisiologia e na melhoria da tecnologia de cultura de algas <sup>[13]</sup>. É neste último ponto que se centra esta dissertação, efectuando um estudo sobre a tecnologia existente actualmente (presente capítulo) e realizando o projecto de um protótipo para produção de biomassa de microalgas (capítulo III), e efectuada uma análise energética.

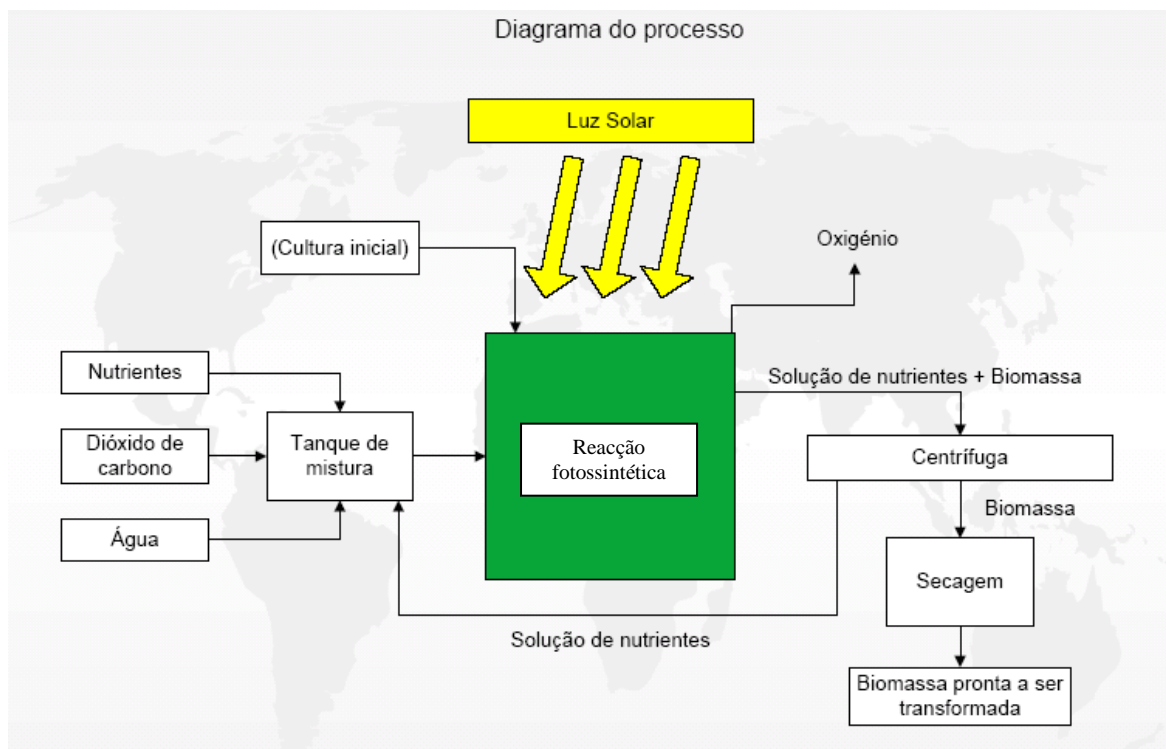
Para a produção de bioenergia através de microalgas, (seja biometano, biodiesel ou biohidrogénio) estas devem obedecer a vários critérios <sup>[12]</sup>:

- Devem ser altamente produtivas;
- Ser facilmente cultivadas através de meios mecânicos;
- Deverão ser produzidas a um custo igual ou inferior a outros tipos de biomassa.

Por sua vez a biomassa entende-se o material de origem biológico, vivo ou não, passível de ser utilizado como combustível ou como matéria-prima para a produção industrial de um produto. No contexto desta tese, a biomassa corresponde as células de microalgas cultivadas e que servirão para produção de óleo para conversão em biodiesel <sup>[30][31]</sup>.

Actualmente, o custo de produção de biomassa de algas é ainda demasiado elevado para ser utilizada unicamente para fins energéticos<sup>[12]</sup>.

A Fig. 4 apresenta um diagrama do processo de produção de biomassa de algas com os principais elementos e as várias etapas necessárias.



**Fig. 4 – Diagrama do processo de produção de biomassa a partir de microalgas.**

Como se pode constatar, o princípio inerente ao desenvolvimento e produção de microalgas é relativamente simples. Vários tipos de tecnologia foram desenvolvidos, procurando dar resposta aos requisitos biológicos desse tipo de culturas como a regulação da composição de nutrientes, controlo da iluminação, agitação da cultura, razão área/volume, no entanto, apesar do elevado potencial das microalgas para a produção de biodiesel, actualmente não é conhecida nenhuma empresa que efectivamente produza biodiesel a partir dessa matéria prima.

### ***1.3. Tipos de cultura de algas***

Existem dois tipos de estratégia de cultura de algas: culturas ditas “abertas” (em tanques ou lagoas a “céu aberto”, Fig. 5 A) e os fotobiorreactores ditos “fechados” (FBR’s, Fig. 5 B) <sup>[32]</sup>.



Um fotobiorreactor é um sistema usado para a cultura de células fotossintéticas, como as algas, e que incorpora uma fonte luminosa (natural ou artificial)<sup>[33]</sup>. Este sistema é definido por um sistema fechado (FBR), porque a cultura não está geralmente em contacto directo com o ar envolvente, em oposição à cultura em sistema aberto designada em inglês por *open pond*.



**Fig. 5 – Tipos de cultura de microalgas: a) - Sistema aberto localizado no Havai, propriedade da Cyanotech Corp.<sup>[34]</sup>; b) - Fotobiorreactor vertical propriedade da Bioking, Holanda<sup>[35]</sup>.**

A principal característica que sobressai nas diferentes concepções é a diferença de áreas necessária para a implementação destes sistemas, que no caso das culturas abertas é consideravelmente maior face aos fotobiorreactores.

### ***1.3.1. Sistemas de cultura de microalgas “abertos”***

Este tipo de sistema consiste em tanques abertos ao ar livre que utilizam a luz do sol e nos quais a cultura de microalgas é mantida em circulação por pás mecânicas até atingir a densidade pretendida<sup>[32]</sup>. Estes sistemas de cultura requerem grandes áreas de cultivo e não permitem um controlo adequado das condições de cultura (temperatura, luminosidade, gases, etc.) pelo que exibem uma baixa produtividade. Contudo, a cultura neste tipo de tanques não requer dispendiosos processos de esterilização ou limpeza do espaço de cultura, para além das concentrações de oxigénio nunca serem excessivas. Para obter monoculturas num sistema aberto, são escolhidas espécies de microalgas particulares com elevada taxa de crescimento e capazes de crescer em ambientes

adversos<sup>[36][37][38]</sup>, seja em meios com pH altos (*Spirulina sp.*) ou com salinidades elevadas (*Dunaliella sp.*).

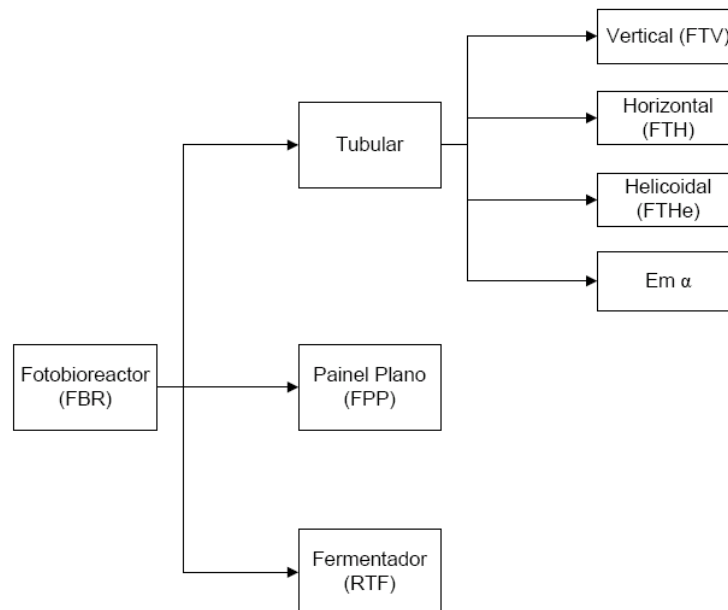
### **1.3.2. Sistemas de cultura de microalgas “fechados” (fotobiorreactores)**

Este modelo de cultura (fotobiorreactor) apresenta muitas vantagens quando comparado com as culturas abertas, como sejam o maior controlo sobre as condições de cultura, possibilidade de cultivar diferentes espécies de microalgas, reduzido risco de contaminação, baixas perdas de água, ou ainda as reduzidas perdas de CO<sub>2</sub> introduzido que, no seu conjunto, se reflectem numa produtividade por área superior<sup>[12] [32][36]</sup>. Contudo os fotobiorreactores são na sua generalidade sistemas caros em termos de custo de construção e de custo operacional.

Embora seja possível cultivar microalgas num fotobiorreactor ao longo de todo o ano, a temperatura e a luz disponível (se natural) limitam a sua utilização ou obrigam ao recurso a sistemas mais ou menos sofisticados de arrefecimento e de iluminação artificial, com óbvio impacto no custo operacional. Os fotobiorreactores podem ser arrefecidos por aspersão de água nas superfícies expostas à luz solar, por passagem da cultura em banhos mais frescos<sup>[24]</sup> ou ainda por sistemas mais complexos de troca térmica<sup>[39]</sup>.

A agitação da cultura é importante de modo a garantir a iluminação uniforme de todas as células em suspensão. Nos fotobiorreactores essa é efectuada mecanicamente, através de bombas<sup>[35][40]</sup>, pás rotativas<sup>[41][42]</sup>, ou através da injeção de ar e CO<sub>2</sub><sup>[24][43][48]</sup>.

Os parâmetros que afectam a configuração do reactor são: a iluminação e a relação entre a superfície iluminada e o volume de cultura, uma vez que a eficiência fotossintética e produtividade de biomassa dependem directamente da luz<sup>[25][36]</sup>; a troca de gases com o meio de cultura (fornecimento de CO<sub>2</sub> e remoção de oxigénio) e área instalada. Em consequência podemos encontrar vários tipos de fotobiorreactores fechados, com diferentes tipos de geometrias, dimensões, materiais e princípios de funcionamento<sup>[36]</sup>. O diagrama da Fig. 6 apresenta os diferentes tipos de concepção que podemos encontrar actualmente.



**Fig. 6 – Diagrama representativo dos vários tipos de fotobiorreactores fechados existentes.**

Destes, os reactores tubulares são os sistemas mais populares, sendo basicamente constituídos por tubos dispostos em várias orientações possíveis. Deste modo temos fotobiorreactores tubulares verticais <sup>[24][44][46][35]</sup>, horizontais <sup>[44][47]</sup>, helicoidais <sup>[39][40] [53]</sup> ou ainda em alfa <sup>[49]</sup>. Os fotoreactores tubulares são construídos com materiais transparentes rígidos, geralmente em acrílico <sup>[24]</sup>. No entanto também podem ser constituídos por grandes sacos de polietileno de baixa densidade <sup>[50][36]</sup>. (Fig. 7) Estes últimos embora mais frágeis, são mais baratos sendo geralmente utilizados na produção de inóculo para volumes superiores de cultura<sup>[2]</sup> ou para produção de microalgas para alimentar bivalves e crustáceos em aquacultura <sup>[19] [51]</sup>.

Nos fotobiorreactor tubulares a maior questão será a eficiência luminosa, que é prejudicada pela curvatura da superfície dos tubos. Isso faz com que parte da luz solar incidente à superfície do tubo seja reflectida, não sendo aproveitada para o crescimento da biomassa <sup>[36]</sup>.



**Fig. 7 – Fotobiorreactores de mangas no exterior da central eléctrica de Redhawk, perto de Phoenix (EUA), propriedade da GreenFuel <sup>[2]</sup>.**

Os fotobiorreactor tubulares horizontais (Fig. 8) permitem um melhor aproveitamento da luz (relativamente a orientação vertical) necessitando no entanto de uma grande área instalada. A disposição horizontal dos tubos também levanta dificuldades relativamente a introdução de  $\text{CO}_2$  e à remoção do  $\text{O}_2$ . A movimentação da cultura é realizada por bombas que impulsionam o meio através da tubagem. No entanto o sistema de bombagem aumenta a tensão de corte restringindo o número de espécies de microalgas possíveis de cultivar neste tipo de sistema <sup>[36]</sup>. Este sistema é utilizado com sucesso desde 1999, na Alemanha (em Klötze) na produção de *Chlorella* como suplemento alimentar <sup>[47]</sup>.

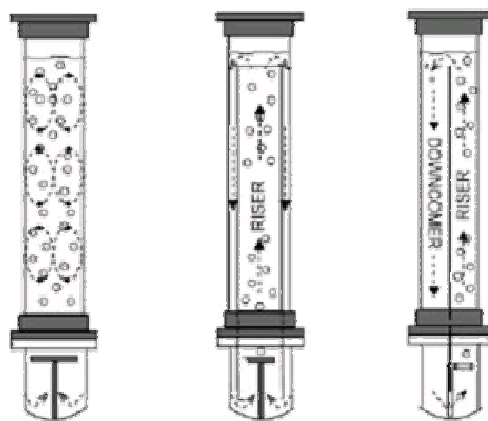


**Fig. 8 – Fotobiorreactor tubular horizontal <sup>[44]</sup>.**

Nos fotobiorreactores tubulares helicoidais a disposição dos tubos garante uma utilização da luz solar mais eficiente, sem no entanto necessitar de muita área de

instalação. Estes fotobiorreactores são normalmente construídos em mangueira de polietileno de pequeno diâmetro (30mm) enrolado em torno de um eixo vertical, os quais podem adoptar uma geometria cilíndrica ou cónica<sup>[39] [53][36]</sup>. Todavia, tal como os fotobiorreactores horizontais, a troca gasosa deverá ser feita através de um permutador de gases, o que dificulta a tarefa de aumento de escala (*scale-up*) destes tipos de reactor.

Os fotobiorreactores tubulares verticais, são menos eficientes relativamente à utilização da luz solar. Contudo estes reactores apresentam uma relação favorável de volume de cultura relativamente à área instalada. Outra vantagem reside na simplicidade do sistema de agitação: este é normalmente realizado através da injeção de ar na parte inferior da coluna (Fig. 9), desta forma é possível homogeneizar o meio de cultura com as microalgas, fornecendo simultaneamente o CO<sub>2</sub> necessário à fotossíntese e removendo de forma eficiente o O<sub>2</sub> resultante desta. A questão da eficiência luminosa é por vezes resolvida recorrendo à iluminação artificial externa ou colocada no interior do mesmo (Fig. 10).



Coluna de bolhas

Colunas *airlift*

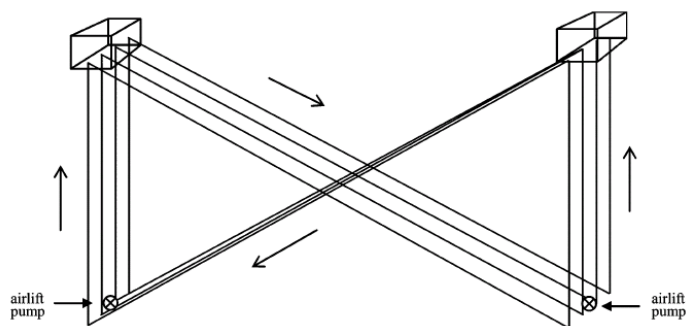
**Fig. 9 – Esquema de configurações de fotobiorreactores de coluna de bolhas e *airlift*<sup>[43]</sup>.**



**Fig. 10 – Fotobiorreator vertical da Universidade de Alicante, Espanha<sup>[46]</sup>**

A concepção de fotobiorreator tubular em alfa deve o seu nome a disposição dos seus tubos e reúne por isso algumas das vantagens dos reactores horizontais e verticais, como seja a eficiência luminosa, as trocas gasosas e uma boa relação volume/área instalada<sup>[49]</sup>. Este reactor é constituído por tubos verticais paralelos cujos topos (inferior de um e superior de outro) estão unidos por tubos oblíquos (cerca de 45°). A cultura é mantida em movimento por sistemas de borbulhamento de ar do tipo *airlift* que arrastam a cultura para os topos dos tubos verticais onde se escoam pelos tubos oblíquos até à base do outro tubo vertical (ver Fig. 11). A sua complexidade dificulta o seu “*scale-up*”.





**Fig. 11 – Esquema de um fotobiorreator tubular em  $\alpha$ .** <sup>[36]</sup>

Os reactores de painel plano são fotobiorreactores constituídos por finos painéis de vidro, acrílico ou PVC entre os quais circula a cultura de microalgas, sendo especialmente concebidos para aproveitarem ao máximo a luz <sup>[48]</sup>. A circulação da cultura é garantida ou por borbulhamento de ar na base do painel ou por bombagem <sup>[54]</sup>. Este sistema de cultura, a semelhança dos restantes reactores iluminados pela luz solar, deve dispor de sistemas de refrigeração seja por aspersão de água, seja pela presença de uma painel duplo através do qual circula o líquido de refrigeração. A relação entre o volume de cultura e área instalada não é todavia favorável para este sistema, sendo a sua construção relativamente complexa.

Os reactores do tipo fermentador são sistemas de cultura fechados, geralmente iluminados artificialmente e agitados mecanicamente, usados para produção de microalgas à escala laboratorial <sup>[41][42]</sup>. Estes reactores permitem o controlo quase total dos parâmetros de cultura (luz, temperatura, gases, agitação, pH, etc.) mas dada a sua complexidade são sistemas caros.

### 1.3.3. Limitações tecnológicas e oportunidades de melhoramento

Como podemos constatar na análise dos fotobiorreactores, a produção de microalgas apresenta sempre uma ou outra limitação técnica. As soluções que existem para essas limitações ou se excluem mutuamente ou apresentam custos associados elevados. Na Tabela 5 é apresentada a uma síntese das principais características dos reactores do tipo fechado.

**Tabela 5 – Principais características dos reactores de concepção fechada.**  
Adaptado de Carvalho, A.P, et al. (2006)<sup>[36]</sup>.

Tipo de reactor	Eficiência da iluminação	Grau de controlo	Área requerida	Scale-up	Produtividade (g L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ); espécies
Tubular vertical	Média	Médio	Médio	Possível	0,5; <i>Porphyridium cruentum</i>
Tubular horizontal	Boa	Médio	Fraco	Possível	0,25; <i>Spirulina platensis</i>
Helicoidal	Média	Bom	Excelente	Fácil	0,7; <i>Nannochloropsis sp.</i>
Tubular em α	Excelente	Bom	Fraco	Muito difícil	0,4; <i>Spirulina platensis</i>
Painel plano	Excelente	Médio	Bom	Possível	0,85; <i>Nannochloropsis sp.</i> 2,15; <i>Spirulina platensis</i>
Tipo fermentador	Fraca	Excelente	Excelente	Difícil	0,03-0,05; várias

As principais deficiências identificadas nas actuais tecnologias residem ao nível da eficiência da iluminação e da razão área iluminada/volume cultivado; do fornecimento/reposição de nutrientes, da remoção do O<sub>2</sub>, da agitação, da manutenção, da contaminação biológica, do controlo da temperatura e do *scale-up*.

Identificadas a principais limitações e deficiências dos sistemas actuais de cultura de algas é importante encontrar novas soluções técnicas de forma a aumentar a eficácia do processo de produção de biomassa em fotobiorreactor. É a esse nível que a contribuição da engenharia é importante<sup>[13]</sup>. Na Tabela 6 são apresentadas algumas soluções para as actuais limitações dos fotobiorreactores tubulares.

**Tabela 6 – Possíveis soluções para as algumas limitações dos fotobiorreactores tubulares.**

<b>Problemática</b>	<b>Solução</b>	<b>Contrapartida</b>
Eficiência da iluminação	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminuir o diâmetro de tubo</li> <li>- Uso de iluminação artificial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminui o volume de cultura</li> <li>- Custo operacional acrescentado</li> </ul>
Razão área iluminada/ /volume cultivado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminuir o diâmetro do tubo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminuição o volume de cultura</li> </ul>
Fornecimento/reposição de nutrientes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Instalação de dispositivos de controlo para medição e compensação automáticos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custo inicial e operacional elevado</li> </ul>
Remoção do O <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Instalação de purgas para extracção do O<sub>2</sub> acumulado nas zonas críticas</li> <li>- Injecção de ar de forma a diluir o O<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possível contaminação pela zona de extracção de O<sub>2</sub>.</li> </ul>
Agitação	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Injecção de ar (vulgarmente usada)</li> <li>- Agitação mecânica (usada apenas nos do tipo fermentador)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevadas tensões de corte geradas pelo regime turbulento podem levar à morte das células.</li> </ul>
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Construção modular, ligação entre componentes através de juntas não permanentes</li> <li>- Aplicação de componentes padronizados</li> <li>- Seccionamento do reactor através de válvulas, que permita isolar o reactor em secções</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento do número de componentes, o que encarece a tecnologia</li> </ul>
Contaminação	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Esterilização de todos os componentes do reactor em contacto com a cultura</li> <li>- Pressurização do reactor, para dificultar a entrada de agentes contaminantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Os processo de esterilização e os materiais empregues devem ser compatíveis</li> <li>- Manutenção e controlo da pressurização</li> </ul>
Controlo da temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Atomização das superfícies com água</li> <li>- Utilização de sistema de ar condicionado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevado desperdício de água</li> <li>- Custo operacional elevado</li> </ul>
<i>Scale-up</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adopção de um sistema modular</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O número de componentes pode ser elevado e a configuração modular difícil de aplicar.</li> </ul>

Podemos verificar na Tabela 6, no projecto de um sistema deste tipo é necessário ter sempre em consideração a relação causa/efeito. A resolução de um problema pode gerar ou agravar outra deficiência.

A complexidade da tecnologia de cultura de microalgas em fotobiorreactores é elevada e requer, para ser bem sucedida, uma concepção eficaz e rentável sob pena de falhar aquando do *scale-up*, como foi o caso das instalações em Múrcia, Espanha e em La Rioja na Argentina <sup>[12] [55]</sup>.



## **Capítulo II**

*No presente capítulo são apresentados os requisitos necessários para definir o projecto do fotobiorreactor, explicando os métodos utilizados. São também apresentados os pressupostos considerados para realizar o estudo energético da produção de biomassa a partir do reactor projectado.*

### **2. Procedimento experimental – Projecto do Fotobiorreactor**

Do estudo realizado no Capítulo I podemos verificar, que para cultivar microalgas pode-se escolher duas estratégias, a cultura em tanque abertos e a cultura em fotobiorreactor. Os fotobioreactores têm custos de instalação e operacionais mais elevados mas permitem um maior controlo sobre as condições de cultura. Foram identificadas algumas limitações mais comuns da cultura de microalgas em fotobiorreactores tubulares e propostas soluções. Assim é objectivo deste trabalho criar um novo conceito de fotobiorreactor que resolva ou minimize os problemas identificados, através da projecção de uma tecnologia versátil, capaz e eficiente que seja compatível com a cultura de diferentes espécies de microalgas, de forma a obter biomassa adequada à transformação em biodiesel, a um custo competitivo.

#### **2.1. Requisitos para dimensionamento do fotobiorreactor**

Para o projecto e dimensionamento do fotobiorreactor é necessário que este possua determinadas características. Assim sendo pretende-se uma tecnologia com os seguintes requisitos:

- Área instalada mínima (elevada razão volume cultura/ área instalada);
- Capacidade de funcionamento com iluminação natural e iluminação artificial;
- Controlo de temperatura;
- Elevado rácio área iluminada/volume de cultura;

- Agitação mecânica;
- Modo de operação contínuo;
- Mecanismo de remoção de oxigénio.

O sistema projectado é versátil e permite testar várias condições de cultura. Uma vez que se trata de um protótipo experimental destinado ao teste de novas opções tecnológicas, e do impacte destas no cultivo de microalgas, a solução tecnológica final pode revelar-se complexa e dispendiosa.

De forma a contrariar a complexidade e minimizar os custos da tecnologia há que ter em conta diversos factores como:

- Construção flexível/ modular;
- Facilidade de limpeza/controlo de contaminação;
- Manutenção baixa;
- Selecção adequada de materiais.

Analizando as configurações apresentadas no Capítulo I, a que apresenta melhor relação volume de cultura/área ocupada é a tubular vertical, sendo por isso esta a configuração adoptada neste trabalho. No Capítulo III serão apresentadas os resultados deste projecto de fotobiorreactor, com as soluções mecânicas adoptadas de forma a que cumpra com as especificações planeadas.

## ***2.2. Dimensionamento do reactor***

O fotobiorreactor proposto foi dimensionado tendo por base as especificações biológicas das espécies de microalgas a cultivar, as dimensões dos materiais padronizados e os requisitos operacionais estabelecidos, recorrendo a um modelo de simulação em MS Exel<sup>[56][57]</sup>. Nesta primeira fase de modelação, foi seleccionada a espécie *Chlorella vulgaris* devido ao seu considerável teor em lípidos (que varia entre ~20 e ~60%, dependendo das condições de cultura<sup>[39][55][57]</sup>), pela sua robustez, pelo extenso conhecimento que existe sobre a sua fisiologia, mas também por já se ter produzido biodiesel de qualidade a partir de microalgas do género *Chlorella*. Assim os valores propostos são um reactor com 8

tubos dispostos verticalmente de dimensões, com diâmetro ( $\varnothing$ ) 300mm x 4mm para um tubo exterior e  $\varnothing$  90mm x 3mm para um tubo interior, para uma altura de cultura de 1500mm, obtendo uma capacidade de cultura de mais de 709 litros.

### ***2.3. Esterilização/desinfecção do FBR***

Para o desenvolvimento de uma cultura de microalgas em monocultura, é necessário impedir a contaminação desta por outros organismos, pois esta pode comprometer a produtividade da cultura. Para tal, deve proceder-se à desinfecção e esterilização de todos os objectos necessários e do interior do reactor, bem como toda a tubagem associada ao protótipo. Existem vários processos de desinfecção e esterilização, uns por processos físicos (calor, irradiação, filtração) e outros por processos químicos (agentes oxidantes, tensoactivos, ácidos e bases fortes) <sup>[60]</sup>. No fotobiorreactor projectado a desinfecção e esterilização será feita com lixívia que é um agente oxidante à base de cloro (hipoclorito de sódio). A escolha do hipoclorito de sódio deve-se ao facto de ser barato, eficaz e sendo também possível neutraliza-lo se necessário. Do ponto de vista de engenharia mecânica esta é a melhor solução. A esterilização deve ser efectuada após a montagem de todos os componentes do reactor, através da circulação de água com lixívia.

Com o fotobiorreactor a operar a prevenção das contaminações recai sobre métodos de esterilização físicos, como a irradiação por ultravioletas em passagem dos meios e águas utilizadas na cultura e pela utilização de filtros nas linhas de ar.

### ***2.4. Soluções mecânicas e materiais***

A selecção dos materiais para o fabrico do fotobiorreactor, devido às condições de trabalho a que vão estar sujeitos, é importante. Os materiais têm que conjugar diferentes níveis de exigências: mecânicas, químicas, e físicas.

Os materiais vão estar submetidos a corrosão por água doce, água salgada e hipoclorito de sódio (durante a esterilização), por isso devem possuir uma boa resistência química.

Os materiais mais usados na construção de fotobiorreactores são metais, ligas metálicas e polímeros. Os metais e ligas metálicas serão usados essencialmente a nível estrutural (sustentação e suporte do fotobioreactor). Os polímeros são usados na definição do volume da cultura e nas tubagens, devem ser transparentes para que a área de exposição da cultura à luz seja o maior possível.

As ligações entre os diferentes materiais podem ser efectuadas através de diversas técnicas, tais como, juntas aparafusadas, juntas coladas e soldadura. É importante a escolha de materiais adequados na vedação das juntas e de colas com composições químicas que sejam compatíveis com o meio ao qual vão estar submetidos, e não reajam com o meio ou libertem substâncias nocivas à cultura.

#### ***2.4.1. Metais e Ligas Metálicas***

Relativamente aos metais, estes têm que ter uma boa resistência mecânica e uma elevada resistência química. Este último factor é o que faz com que a escolha de metais e ligas metálicas recaia sobre os aços inoxidáveis, isto porque os componentes metálicos vão estar em contacto com um meio agressivo para os metais sendo o risco de contaminação da cultura eminente.

As ligações entre os vários componentes metálicos é efectuada através de juntas aparafusadas ou por soldadura, dependendo do componente em causa.

A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis depende basicamente, da composição química e da sua microestrutura. De um modo geral pode-se afirmar que os aços inoxidáveis martensíticos são os menos resistentes e os austeníticos os mais resistentes à corrosão <sup>[61]</sup>.

Dado que o meio corrosivo pode ser água salgada os aços inoxidáveis que melhor se adaptam a este ambiente são os aços inoxidáveis austeníticos AISI 316, AISI 316L e AISI 317, como podemos constatar na tabela seguinte.

**Tabela 7 - Selecção de um aço inoxidável para um dado meio corrosivo [61].**

AISI	Atmosfera branda e água fresca	Atmosfera industrial	Atmosfera marinha	Água salina	Química branda	Química oxidante	Química redutora
301	X	X	X		X	X	
302	X	X	X		X	X	
302B	X	X	X		X	X	
303	X	X	X		X		
304	X	X	X		X	X	
304L	X	X	X		X	X	
305	X	X	X		X	X	
308	X	X	X		X	X	
309	X	X	X		X	X	
310	X	X	X		X	X	
314	X	X	X		X	X	
316	X	X	X	X	X	X	X
316L	X	X	X	X	X	X	X
317	X	X	X	X	X	X	X
321	X	X	X		X	X	
347	X	X	X		X	X	
403	X				X		
405	X				X		
409	X				X		
410	X				X		
416	X						
420	X						
430	X	X			X	X	
440 <sup>a</sup>	X				X		
440B	X						
440C	X				X	X	
442	X	X			X	X	
446	X	X	X		X	X	

Observação: o X indica resistência

Os aços mais comuns em aplicações marítimas são os aços inoxidáveis AISI 316 e AISI 316L, o aço inoxidável AISI 316 é também muitas vezes considerado como sendo o “*marine grade stainless steel*” [62].

A escolha do aço aplicar neste projecto recai sobre o aço inox AISI 316L, isto porque para além de possuir boa resistência ao meio salino, nos aços do tipo L, o teor de carbono é

mais baixo, o que dificulta a precipitação intergranular de carbonetos de crômio, que pode ocorrer a temperatura elevada ( $>500^{\circ}\text{C}$ ) durante o processo de soldadura. Consequentemente, estes aços, de baixo teor de carbono, vêm as suas propriedades de resistência à corrosão menos afectadas na zona de soldadura <sup>[63]</sup>.

As aplicações mais comuns do aço AISI 316/L são <sup>[62][64][68]</sup>.

- Equipamentos para preparação de alimentos;
- Bancadas e equipamentos de laboratório;
- Planeamentos arquitectónicos e balastros costeiros;
- Acessórios para embarcações;
- Contentores químicos, inclusive para transporte;
- Permutadores de térmicos;
- Parafusos e porcas;
- Molas.

A tabela seguinte apresenta a composição química e as propriedades mecânicas e físicas dos aços inoxidáveis AISI 316 e AISI 316L.

**Tabela 8 – Composição química e propriedades mecânicas e físicas dos aços AISI 316/L [61]-[68].**

		AISI 316	AISI 316L
Composição Química [%]	C	0,08 máx	0,03 máx
	Mn	2 máx	2 máx
	Si	0,75 máx	0,75 máx
	P	0,045 máx	0,045 máx
	S	0,03 máx	0,03 máx
	Cr	16-18	16-18
	Mo	2-3	2-3
	Ni	10-14	10-14
	N	0,1 máx	0,1 máx
	Ti	-	0,5 máx
Propriedades Mecânicas	Resistência à tracção [Mpa]	515	485
	Resistência à Compressão [Mpa]	170	170
	Tensão cedência a 0,2% [Mpa]	205	170
	Alongamento mínimo (L=5d) [%]	40	40
	Dureza (HRB)	95	95
Propriedades Físicas	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	8	8
	Temperatura de Fusão [°C]	1375-1400	1375-1400
	Módulo de Elasticidade [Gpa]	193	193
	Resistividade Eléctrica [ $\Omega$ .m]	0,074x10	0,074x10
	Condutibilidade Térmica a 100°C [W/m.k]	16,3	16,3
	Coefficiente de Expansão Térmica a 100°C [/ K]	15,9x10 <sup>-6</sup>	15,9x10 <sup>-6</sup>
	Temperatura Máxima de Serviço [°C]	870	870

O aço AISI 316/L para além de possuir boa resistência química a ambientes salinos, possui também uma resistência química considerada razoável ao hipoclorito de sódio [69].

### **2.4.2. Polímeros**

Relativamente aos polímeros, normalmente estes encontram-se nos fotobiorreactores, em aplicações como, câmara do reactor, vedantes, juntas e tubagem.

A câmara do fotobiorreactor deve ser transparente para que a luz exterior chegue à cultura, o material mais usado para cumprir este requisito é o vidro acrílico.

Ao nível das tubagens o material mais usado neste tipo de aplicações é o PVC, também muito usado na produção de aquários de água doce e salgada devido à sua elevada resistência química a este tipo de ambientes.

Ao nível de vedantes, o princípio de trabalho das vedações com polímeros é a colocação da junta entre as peças a unir, que pode ser através de um *center-ring* de dimensões estandardizadas ou em um canal para colocação do vedante, que será apertado contra a peça a vedar.

#### **2.4.2.1. Acrílico**

Acrílico ou polimetil-metacrilato (PMMA) é um material termoplástico rígido e transparente; também pode ser considerado um dos polímeros mais modernos e com maior qualidade no mercado, pela sua facilidade de adquirir formas, pela sua leveza e alta resistência. É também chamado vidro acrílico <sup>[70]</sup>.

O acrílico dependendo do seu processo de produção pode tomar a denominação de acrílico CN ou acrílico EX, acrílico CN para o acrílico fundido e acrílico EX para o acrílico extrudido <sup>[71]</sup>. A tabela seguinte apresenta as propriedades do acrílico CN e EX.



**Tabela 9 – Propriedades do Acrílico (valores indicativos) <sup>[71]</sup>.**

Tabela de características	Norma de ensaio			Unid.	Acrílico CN		Acrílico EX	
	ISO	NF	Outras		mm	Valor obtido	mm	Valor obtido
Propriedades gerais								
Absorção de água em 8 horas	R62 T51002		DIN 53495	%	4	0,5	4	0,5
Densidade	R1183	T51063	DIN 53479	g/cm³	1,19		1,19	
Propriedades mecânicas								
Coefficiente de Poisson a 20°C					0,39		0,39	
Ensaio de tracção a 23°C	R527	T51034	DIN 53455					
Esforço de rotura				MPa	4	76	4	74
Módulo de Elasticidade				MPa	4	3300	4	3300
Alargamento da rotura				%	4	6	4	5
Ensaio de tracção a 80°C	R527	T51034	DIN 53455					
Esforço de rotura				MPa	4	24		
Alargamento da rotura				%	4	22		
Dureza Rockwell, Escala M	D 2039		ASTM D785		95		90	
Resistência à compressão	R684	T51101	DIN 53454	MPa	4	130	4	110
Propriedades ópticas								
Transmissão luminosa	T51068 DIN 5036							
Espessura 3 mm				%	3	>92	3	>92
Espessura 5 mm				%	5	>92	5	>92
Espessura 8 mm				%			8	>92
Espessura 10 mm				%	10	>92		
Índice de refração	T51064		DIN 53491		1,492		1,492	

\*Continuação Tabela 9

Tabela de características	Norma de ensaio			Unid.	Acrílico CN		Acrílico EX	
	ISO	NF	Outras		mm	Valor obtido	mm	Valor obtido
Propriedades térmicas								
Coeficiente de dilatação linear	EN 2155-1	T51251	DIN 52328	Mm/m/°C	0,065		0,07	
Condutividade térmica	DIN 52612			W/m/°C	0,17		0,19	
Calor específico	ASTM C351			J/g/°C	1,32		1,32	
Coeficiente K de isolamento	DIN 4701							
Espessura 3mm				W/m/°C	3	5,3	3	5,3
Espessura 5mm				W/m/°C	5	4,1	5	5,1
Espessura 10mm				W/m/°C	10	4,5	10	4,5
Ponto de amolecimento Vic at B 10/10	R306	T51021	DIN 53460	°C	>110		>103	
Temperatura de deformação	R 75/A	T51005	DIN 53461	°C	109		102	
Temp. máxima de utilização continua				°C	85		80	
Temp. estufa de moldagem				°C	130-180		140-170	
Temp. máxima de aquecimento				°C	200		190	
Temp. max. Superficial em infravermelho				°C	230		210	
Temp. de princípio de degradação				°C	285		240	

Propriedades ópticas:

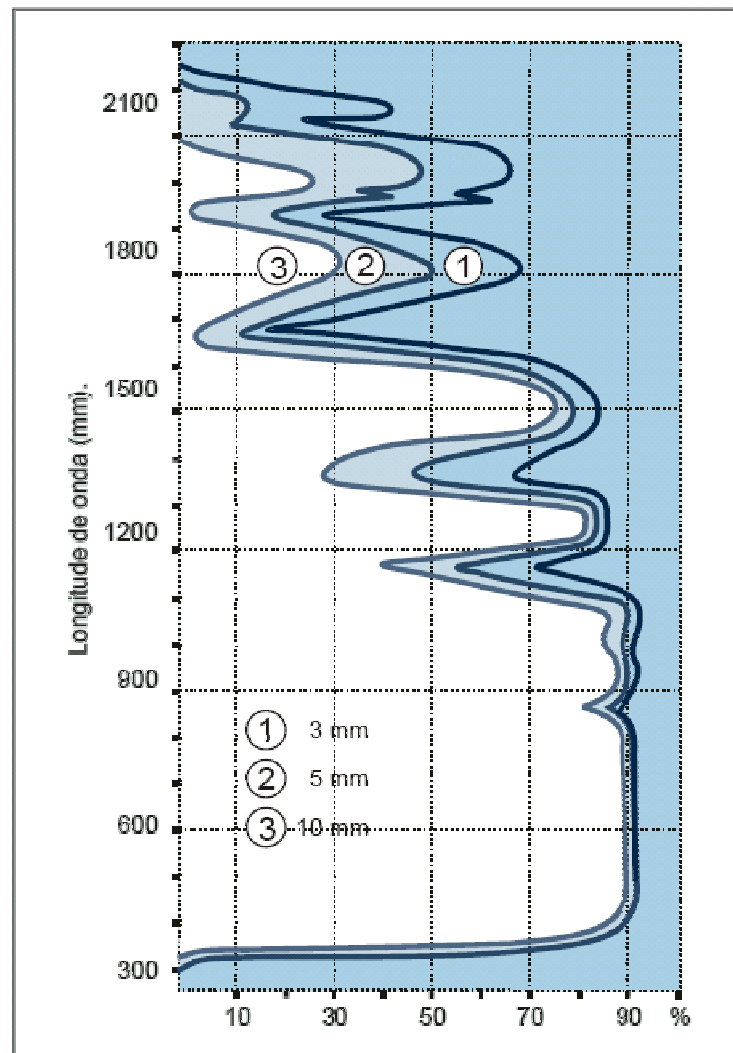


Fig. 12 – Espectro de transmissão UV, Visível, I.R, em acrílicos de 3, 5 e 10 mm de espessura <sup>[71]</sup>.

Os organismos fotossintéticos, como as algas, transformam a luz visível, parte do espectro entre os 400 e os 700nm (correspondente à PAR), em energia química. Analisando a Fig. 12 verificamos que o acrílico possui excelentes propriedades ópticas tendo um índice de transmissão de 92% para os comprimentos de onda desejados.

Comportamento ao envelhecimento natural (medidas efectuadas num clima da Europa Central):

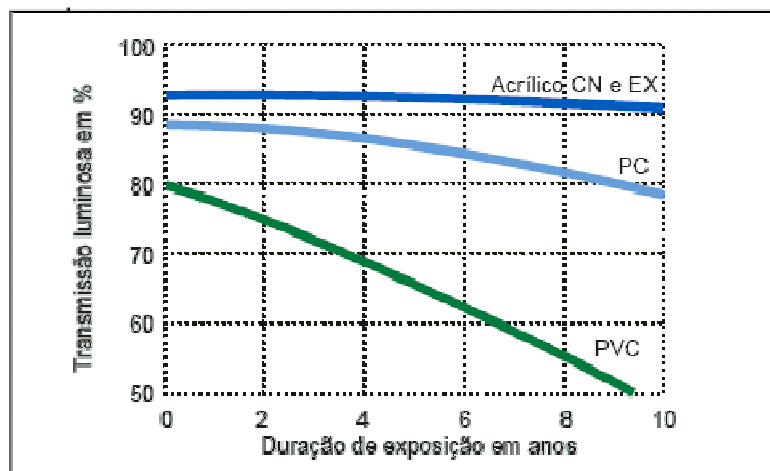


Fig. 13 – Variação da transmissão luminosa de vários materiais em função do tempo de exposição à intempérie <sup>[71]</sup>.

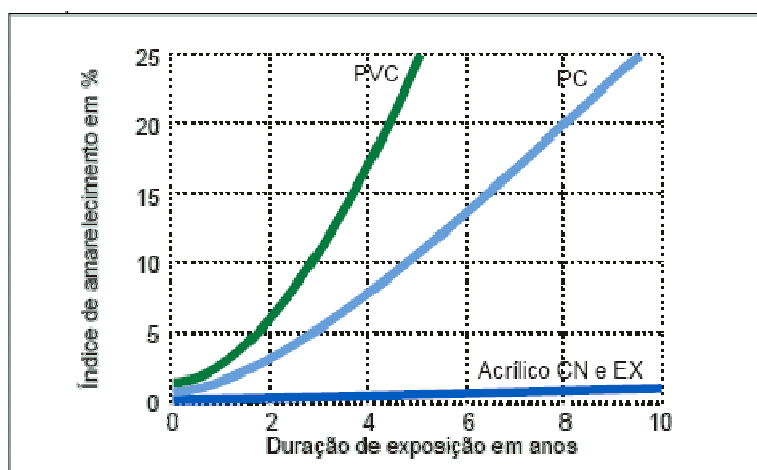


Fig. 14 – Variação do índice de amarelecimento de vários materiais em função do tempo de exposição à intempérie <sup>[71]</sup>.

Através dos gráficos da figura 23 e da figura 24 podemos concluir que para um período de 10 anos a perda de propriedades ópticas do acrílico não é significativa assim como o índice de amarelecimento.

**Acrílico CN versus Acrílico EX:**

O acrílico CN e EX possuem propriedades físicas pouco diferenciadas. Ambos têm um excelente comportamento ao envelhecimento natural. As suas diferenças mais sensíveis residem nas suas propriedades térmicas e químicas, assim como na sua transformação <sup>[71]</sup>.

O método de fabrico do acrílico CN permite ligeiras variações de espessuras, enquanto que no fabrico do acrílico EX essas variações são insignificantes ou mesmo nulas <sup>[71]</sup>.

O acrílico CN possui uma massa molecular média muito superior à do acrílico EX (2200000 contra 150000), com uma zona de distribuição mais ampla, o que lhe confere uma resistência térmica superior e uma melhor resistência à microfissuração (quebra) sob a acção de solventes <sup>[71]</sup>.

O acrílico fundido possui uma qualidade superficial e uma pureza óptica ligeiramente superior ao acrílico extrudido <sup>[71]</sup>.

O acrílico CN e o acrílico EX possuem uma boa resistência química tanto a água salina como ao hipoclorito de sódio <sup>[71]</sup>.

**2.4.2.2. PVC**

O PVC (policloreto de vinil) é usado neste tipo de aplicação em componentes que vão desde a tubagem, válvulas e falanges.

Dado o meio corrosivo ao qual o PVC vai estar exposto é muito importante que este tenha uma boa resistência química. O PVC pode dividir-se em dois grupos PVC-C (policloreto de vinil clorinado) e PVC-U (policloreto de vinil não plastificado) <sup>[73]</sup>, ambos possuem uma boa resistência química tanto ao nível da água salina como hipoclorito de sódio <sup>[74][75][76]</sup>.

### 2.4.2.3. Nitilo, Viton e Teflon

A tabela seguinte apresenta os materiais, e respectivas características, mais utilizados em elementos de vedação.

**Tabela 10 – Propriedades do Nitrilo, Viton e Teflon** <sup>[77][78][79][80][81]</sup>.

	Nitrilo (Buna-N)	Viton	Teflon (PTFE)
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	1	1,86	2,2
Dureza [shore A]	40-95	55-95	50-80
Tensão de cedência [MPa]	27	20	10
Temperatura máxima [°C]	121	204	260
Resistência química a água salgada	Excelente	Excelente	Excelente
Resistência química ao hipoclorito de sódio	Boa	Excelente	Excelente

## 2.5. Modelação e Simulação

Graças à enorme evolução dos computadores pessoais verificada na última década, abriu-se as portas à generalização de programas de simulação, anteriormente limitados apenas a super-computadores. Surgiram então no mercado diversas soluções para satisfazer a procura por parte dos utilizadores, com interfaces acessíveis e de fácil utilização. O CAD (do inglês *computer-aided design*), é uma dessas soluções sendo utilizado principalmente na elaboração de peças de desenho técnico em duas dimensões (2D) e para criação de modelos tridimensionais (3D), permitindo criar e testar geometrias e problemas complexos sem a necessidade de construção de protótipos. É amplamente utilizado em arquitectura, design, engenharia mecânica, engenharia geográfica e em vários outros ramos da indústria. O software CAD usado nesta dissertação foi o CATIA V5R17 da Dassault Systemes, para desenho dos componentes, bem como a modelação tridimensional do protótipo. O mesmo software foi usado para simulação e optimização geométrica dos componentes, recorrendo ao método dos elementos finitos, sendo a malha refinada de acordo com o tipo de solicitação e geometria do componente.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um modelo matemático de análise e resolução, quase sempre aproximada, de problemas científicos e de engenharia. O MEF é utilizado, na generalidade das vezes, em problemas para os quais não se conhece uma solução exacta que possa ser expressa de forma matemática. Como tal, o método dos elementos finitos é um método numérico e não um método analítico. As abordagens numéricas aos problemas de engenharia são necessárias pois, na maioria das situações, os métodos analíticos não conseguem dar resposta satisfatória à resolução de problemas reais complexos, muito frequentes em engenharia <sup>[82]</sup>.

## 2.6. Eficiência do processo (Q)

A eficiência máxima alcançável (Q), como foi demonstrado no subcapítulo 1.1 depende de vários factores, sendo estes factores de origem biológica e de origem tecnológica <sup>[22]</sup> (Tabela 11).

A fracção (F) da eficiência teórica conseguida na conversão da energia PAR em energia da biomassa é dada pela equação:

$$F = \frac{Q}{Q_{teo}} \quad (5)$$

Podendo o valor de F pode ser decomposto em duas componentes, a componente associada aos factores biológicos ( $F_{biológico}$ ) e na componente associada aos factores tecnológicos ( $F_{tecnológico}$ ).

$$F = F_{biológico} \times F_{tecnológico} \quad (6)$$

$$F_{biológico} = Q_{ef} \times Q_{rfua} \times Q_{vida-luz} \times Q_{vida-sombra} \quad (7)$$

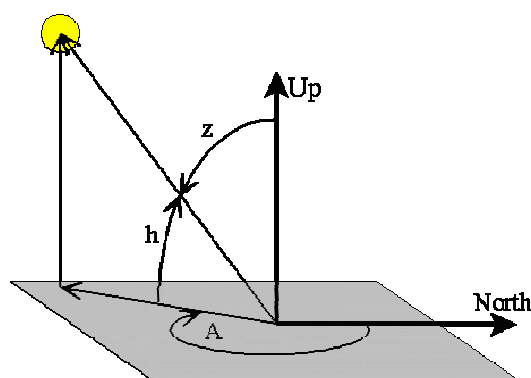
$$F_{tecnológico} = Q_{ct} \times Q_{lp} \times Q_{sombra} \times Q_{refl} \times Q_{processo} \times Q_{disp} \times Q_{tec} \quad (8)$$

Tabela 11 – Factores que afectam a eficiência da conversão de energia.

Factores		Nomenclatura
Biológicos	Eficiência máxima teórica.	$Q_{teo}$
	Eficiência fotossintética, que é a medida do quão bom é o OF a evitar os efeitos de fotossaturação e fotoinibição.	$Q_{ef}$
	Percentagem de PAR absorvida pelo OF.	$Q_{rfaa}$
	Percentagem de energia absorvida utilizada para funções de suporte de vida do OF durante o período de luz.	$Q_{vida-luz}$
	Percentagem de energia absorvida utilizada para funções de suporte de vida do OF durante o período de sombra.	$Q_{vida-sombra}$
Tecnológicos	Coefficiente de transmissão da parede do FBR.	$Q_{ct}$
	Estado de limpeza da parede do FBR.	$Q_{lp}$
	Percentagem dos efeitos do sombreamento no campo da energia solar.	$Q_{sombra}$
	Percentagem de radiação reflectida pela parede do FBR.	$Q_{refl}$
	Eficiência com que a biomassa é recolhida, processo de secagem.	$Q_{processo}$
	Disponibilidade máxima da instalação, manutenção programa e imprevista.	$Q_{disp}$
	Quão fiável e reprodutivo é o FBR.	$Q_{tec}$

## 2.7. Percurso solar

De forma a poder definir a configuração de um possível *scale-up* do protótipo projectado é necessário saber a posição do sol relativamente às coordenadas pretendidas. Recorrendo à aplicação *Sun Shadow Applet* <sup>[83]</sup> foi possível determinar a posição do sol relativamente às coordenadas geográficas da cidade de Aveiro (latitude: 40,62°N e longitude 8,66°O) <sup>[84]</sup>, obtendo o valor de 25,9° de elevação mínima para o dia 21 de Dezembro, e máximo para o dia 21 de Junho para o ano 2008.



$h$  = ângulo de elevação, medido a partir do horizonte.

$z$  = ângulo zénite, medido a partir de vertical

$A$  = ângulo azimute, medido a partir do Norte no sentido dos ponteiros do relógio.

Fig. 15 – Ângulos de posicionamento solar <sup>[85]</sup>.



Sabendo as coordenadas esféricas ( $r, \theta, \phi$ ), obtemos as coordenadas cartesianas ( $x, y, z$ ) <sup>[86]</sup>:

$$x = r \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad (9)$$

$$y = r \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) \quad (10)$$

$$z = r \cdot \cos(\theta) \quad (11)$$



## Capítulo III

No capítulo III, é apresentado o projecto do fotobioreactor, o seu dimensionamento e selecção dos materiais. Será também realizado uma análise energética do processo de produção de biomassa e extracção de óleo, bem como uma análise dum possível *scale-up*.

### 3. Projecto do fotobiorreactor

Como foi referido no Capítulo II a concepção adoptada para projecto neste trabalho foi a geometria tubular vertical, devido ao facto desta concepção permitir um maior volume de cultura para uma área instalada mais reduzida, estando o volume dependente do diâmetro dos tubos e da sua altura. Neste capítulo será apresentado um sistema de produção de microalgas cujas soluções mecânicas adoptadas, procuram dar resposta às limitações associadas aos diferentes tipos de fotobiorreactores apresentadas no Capítulo I (temperatura, iluminação, extracção do  $O_2$ , agitação, área iluminada/volume cultura).

Para o projecto do fotobioreactor, foi adoptada uma construção modular de forma a tornar flexível o processo de maquinação, montagem dos componentes e limpeza do sistema. Desta forma o projecto mecânico do fotobiorreactor foi restringido ao estudo e desenvolvimento mecânico de um módulo correspondente a uma coluna (Fig. 16). O reactor será constituído por uma série de colunas idênticas, podendo estas serem controladas individualmente ao longo do percurso de crescimento da cultura.

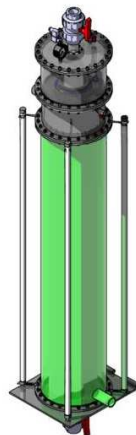
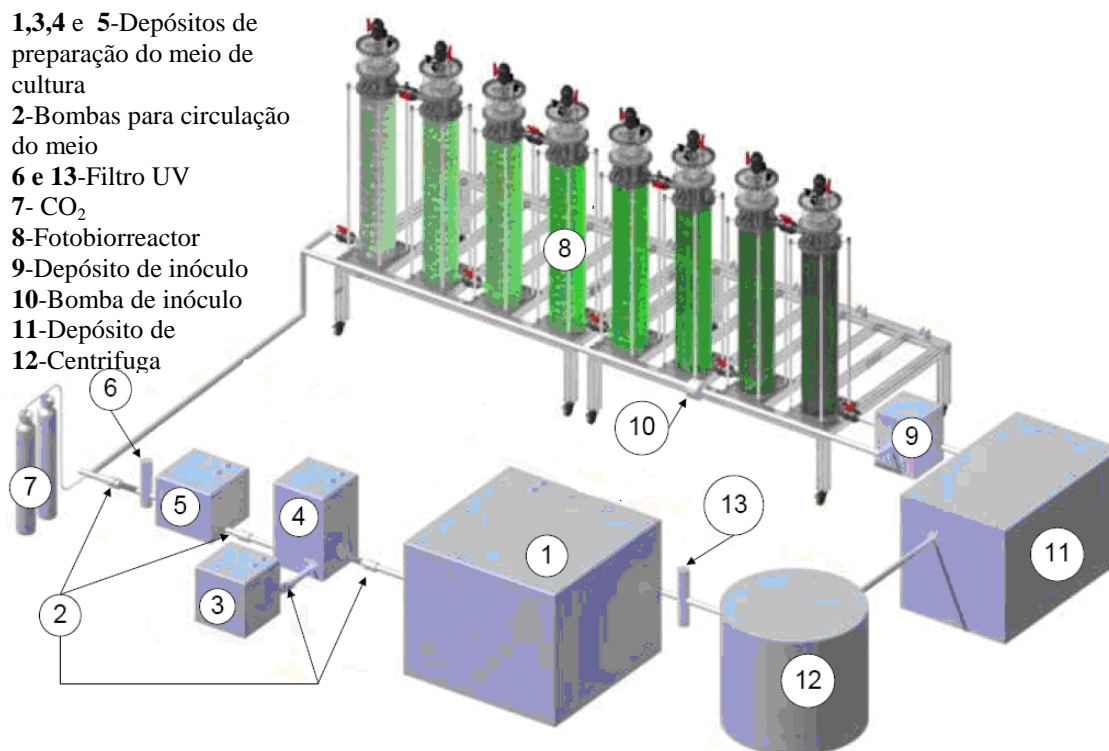


Fig. 16 – Aspecto geral da coluna desenvolvida.

A minimização de manutenção é conseguida graças a uma correcta escolha de materiais de forma a garantir um bom desempenho e otimizar os custos de equipamento.

A Fig. 17 apresenta o fotobiorreactor desenvolvido enquadrado numa possível linha de produção de funcionamento em contínuo com centrifugação em linha.



**Fig. 17 – Projecto do fotobiorreactor desenvolvido.**

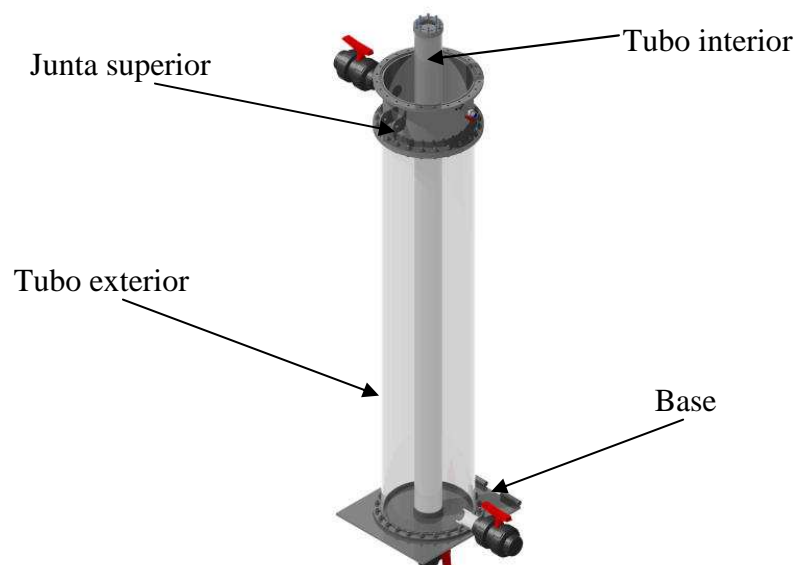
Para a realização do projecto mecânico foi utilizado o software de modelação CATIA, sendo a simulação de elementos finitos realizada no mesmo.

### 3.1. Projecto mecânico

Para que o sistema obtenha as características pretendidas (área ocupada mínima; funcionamento com iluminação natural e iluminação artificial; controlo de temperatura; elevado rácio área iluminada/volume de cultura; agitação mecânica; modo de operação contínuo; extracção de oxigénio;) foram idealizados diferentes componentes mecânicos os quais se encontram de seguida descritos.

#### 3.1.1. Câmara de cultura

A câmara de cultura é o espaço onde a cultura se encontra confinada dentro de cada coluna. Esta é composta por vários componentes base, o tubo interior, o tubo exterior e a junta superior.



**Fig. 18 – Conjunto base, tubo exterior, tubo interior e junta superior de uma coluna.**

Os tubos são ambos em acrílico transparente de a forma a que a luz chegue à cultura encontrando-se acoplados aos restantes componentes através de flanges aparafusadas em aço inox AISI 316L. Os tubos são *standard* de dimensões Ø300x4mm para o tubo exterior e Ø90x3mm para o tubo interior, com uma altura de 1500mm . A ligação entre colunas é efectuada na base do tubo exterior e na junta superior de cada coluna, permitindo assim

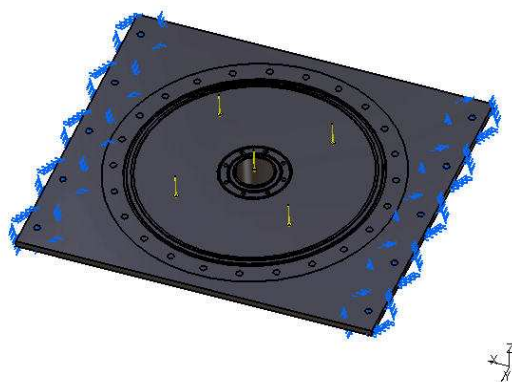
que o sistema funcione em contínuo (Fig. 17). Todas as entradas e saídas de fluido na coluna possuem uma válvula em PVC também standard comercializada pela CEPEX <sup>[87]</sup> com a ref. 05 61 650 VI, esta válvula para além de permitir isolar individualmente cada coluna em caso de emergência ou para manutenção, permite ao reactor operar em lote.

A inserção de um tubo interior tem várias vantagens como; a possibilidade de iluminação artificial interior, controlo de temperatura por circulação de fluido refrigerante, e o aumento da razão área iluminada/ volume de cultura, embora reduza parte do volume de cultura.

A base é o elemento mecânico que suporta o peso da coluna de água e o peso dos restantes componentes que compõem cada coluna do reactor, devendo ser suficientemente robusta para suportar todo o peso nela aplicado, bem como possuir uma boa resistência à flexão para garantir a rigidez das juntas aparafusadas, evitando dessa forma o risco de fuga de fluído. O material usado neste elemento é aço inox AISI 316L, devido à sua excelente resistência química ao meio salino da cultura.

A geometria final para a base de cada coluna, foi otimizada através um processo iterativo de simulação com base no método de elementos finitos, realizado no software CATIA V5 R17. As dimensões da base são 440x390x8mm, possui furação para fixação da base à estrutura, da flange do tubo exterior e tubo interior, bem como as caixas para colocação de o'rings de vedação. Ao centro da base é soldado um tubo de Ø50mm de diâmetro exterior através qual circulará o meio de refrigeração (ver anexo 1).

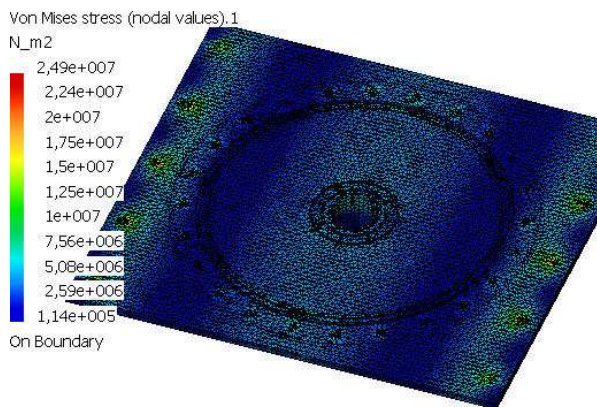
A Fig. 19 apresenta os pontos de fixação e o local de aplicação de carga simulados.



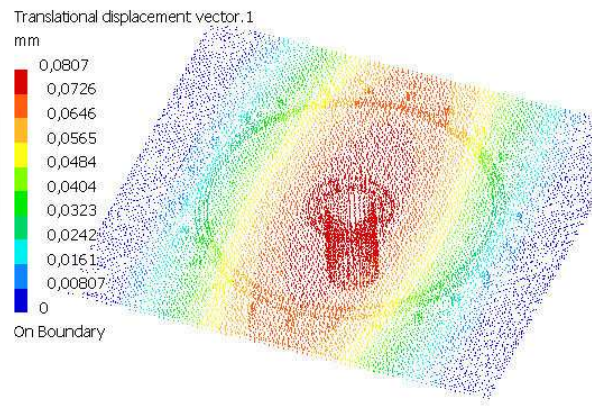
**Fig. 19 – Pontos de fixação e o local de aplicação de carga na simulação da base.**

Para tornar a simulação o mais real possível os pontos de fixação considerados foram, os locais no qual a base irá ser apoiada e aparafusada à estrutura, como podemos ver na Fig. 19. As cargas consideradas foram, o peso de coluna de água (110kg) aplicado na zona central da base e o peso dos restantes componentes (60kg estimado através software CATIA) aplicado na zona de apoio da falange. Foi desprezado o peso próprio da base por ser bastante pequeno (10kg) relativamente ao peso total dos restantes componentes e a coluna de água.

O tipo de malha usado foi tetraédrica linear de tamanho 5mm e desvio absoluto 2mm, obtendo um total de 24346 nós e 87482 elementos. A Fig. 20 e Fig. 21 apresentam os resultados obtidos na simulação.



**Fig. 20 – Campo de tensões equivalentes de Von Mises da base.**



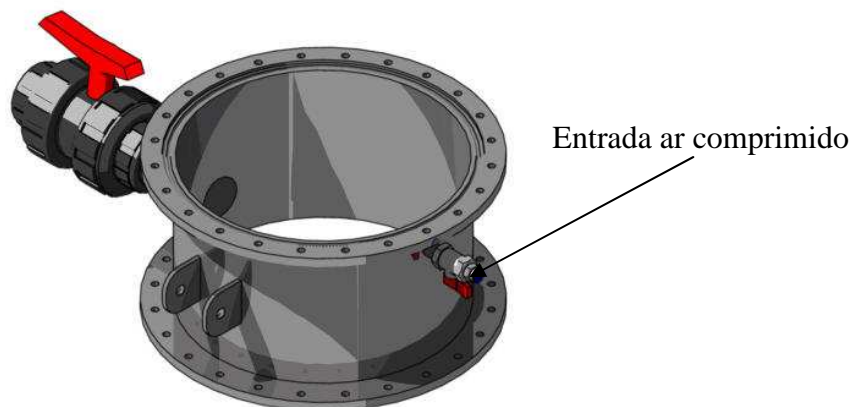
**Fig. 21 – Campo de deslocamentos da base.**

Nas condições de trabalho, o material fica submetido a uma tensão máxima de apenas 24,9MPa, valor este muito aquém da tensão de cedência do aço inox AISI 316L (170MPa).

O campo de deslocamentos é aceitável, na medida em que o valor máximo obtido (0,0807mm), não apresenta risco de colapso da vedação.

A Fig. 22 ilustra a solução adoptada na parte superior da coluna, para garantir um alinhamento fácil e preciso da passagem da cultura de uma coluna para outra. Pretende-se um componente único e versátil para ser aplicado em diferentes posições nas várias

colunas que constituem o fotobiorreactor. Este componente é construído em aço inox AISI 316L, e permite a rotação com intervalo mínimo de 15° (ver anexo I).



**Fig. 22 – Junta superior.**

Este componente possui também uma entrada de ar comprimido filtrado mantendo assim cada coluna pressurizada de forma a minimizar possíveis contaminações exteriores.

#### ***3.1.1.1. Juntas Coladas***

Dada a necessidade de estabelecer uma ligação rígida entre materiais metálicos e polímeros a solução efectuada foi através de juntas coladas.

A escolha da cola é essencial nesta operação, uma vez que, para além das propriedades mecânicas desejadas, esta deve ter uma boa compatibilidade química com meio, de forma a evitar reacções químicas indesejáveis que comprometam a ligação ou contaminem a cultura.

Uma vez que a informação detalhada acerca da composição química do adesivo, não ser disponibilizada pelo fabricante, para a selecção do adesivo foram contactados vários fabricantes, para que aconselhassem um adesivo capaz de colar aço inoxidável a acrílico e com boa resistência a água salgada, a hipoclorito de sódio e compatíveis com culturas celulares. A resposta foi positiva por parte da Hunstman que sugeriu o adesivo Araldite® 2021, como sendo a melhor opção para a aplicação desejada.



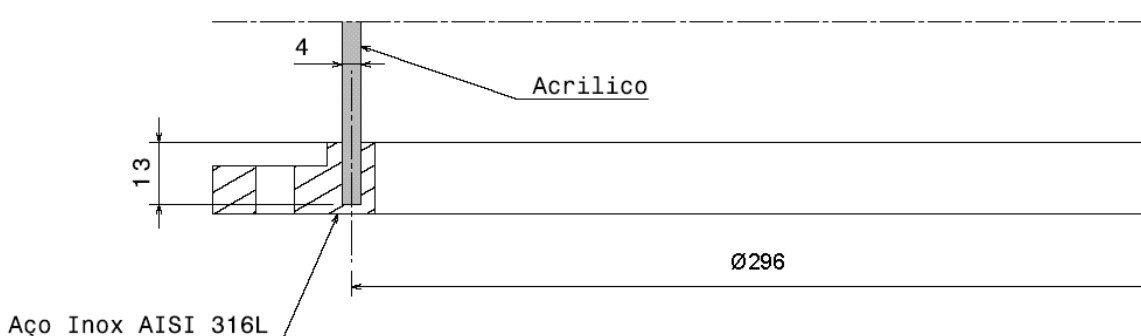
Araldite® 2021 é uma mistura de dois componentes (resina e endurecedor), cujas propriedades mecânicas estão apresentadas na tabela seguinte.

**Tabela 12 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2021** <sup>[88][89]</sup>.

Araldite® 2021	
Módulo de Elasticidade (E)	1800 MPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,35
Tensão de Corte (τ)	22 MPa

#### Cálculo da junta colada:

A figura seguinte apresenta a geometria da junta colada.



**Fig. 23 – Geometria da junta a colar.**

Para efeito de cálculo considera-se a pressão no interior do reactor que irá solicitar a junta à tracção, desprezando o peso próprio dos componentes da junta e dos restantes componentes nela sobrepostos.

A pressão no interior de cada coluna do reactor será de 0,15 bar (pressão da coluna de água, considerando uma coluna com 1,5 m), mais a pressão de 1,1 bar (absoluta) ao qual o reactor será submetido para efeito de controlo de contaminação e manutenção.

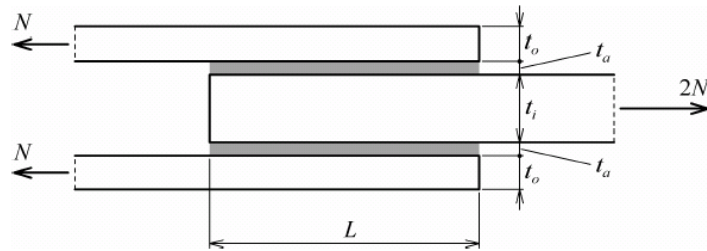
$$Pressão_{interior} = P_i = 0,25bar$$

Considerando como uma junta de sobreposição dupla ao corte o critério usar é o seguinte (Fig. 24) <sup>[90][91]</sup>:

$$\text{Dupla: } L_{\min} = 12.5/\lambda$$

$$\tau_{a,\max} = \frac{\lambda(1+\Omega)N}{4}, \quad \psi = \frac{E_i t_i}{2E_o t_o}$$

$$\Omega = \left| \frac{\psi - 1}{\psi + 1} \right|, \quad \lambda = \sqrt{\frac{2G_a(\psi + 1)}{E_i t_i t_a}}$$



**Fig. 24 – Critério para o dimensionamento de juntas de sobreposição dupla ao corte .**

Força aplicada na base:  $F = P \times A = 1,67 \text{ KN}$

Sabendo:

$$E = 1800 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,35$$

$$E_i = 3300 \text{ MPa}$$

$$t_i = 4 \text{ mm}$$

$$E_o = 193 \text{ GPa}$$

$$t_o = 3 \text{ mm}$$

$$t_a = 0,1 \text{ mm}$$

Temos uma tensão de corte máxima na junta de:  $\tau_{a,\max} = 0,1 \text{ MPa}$

Largura mínima da junta:  $L_{\min} = 10,68 \text{ mm}$

Como podemos verificar a tensão de corte ao qual o adesivo vai estar sujeito (0,1MPa) é muito inferior à própria tensão de corte do adesivo (22MPa), não apresentando deste modo motivo para preocupação em relação à resistência da junta. No entanto para garantir uma boa vedação e uma colagem eficaz é necessário ter em atenção vários factores, os quais são referidos de seguida.

#### Preparação dos substratos <sup>[88][89]</sup>.

A fim de obter a melhor aderência em ambos os substratos, é recomendado a preparação dos mesmos antes da colagem. Na maioria dos casos, a abrasão do substrato (por exemplo com lixa) e desengorduramento com um solvente como a acetona, o etanol ou isopropanol contribuirão para aumentar a durabilidade da montagem colada.

Abrasão do substrato/rugosidade <sup>[88][89]</sup>.

A rugosidade ideal para colar substratos metálicos é  $3 < Ra < 5$ .

Essencial para obter a máxima resistência na colagem <sup>[88][89]</sup>.

- A resina e endurecedor devem ser correctamente proporcionados e completamente misturados.
- As superfícies a colar devem ser desengorduradas e, quando necessário, pré-tratamento.
- Para obter a melhor resistência do adesivo é recomendada uma espessura de adesivo 0,05-0,2 mm.
- Temperatura e tempo cura devem ser o correcto.
- *Jigs* ou outros equipamentos devem ser utilizados para impedir o deslocamento das superfícies durante o processo de cura.
- Embora apenas seja necessária uma leve pressão, essa deve ser aplicada de modo tão regular quanto possível ao longo de toda a área colada. A pressão excessiva deixa a junta com défice de adesivo. Em condições de laboratório, a pressão aplicada é geralmente 30 - 50 N para uma área de colagem de 312,5 mm<sup>2</sup>. Este valor pode ser ajustado em função de viscosidade do adesivo.

### 3.1.1.2. Juntas Aparafusadas

De seguida são apresentados os cálculos da junta aparafusada base/falange inferior do tubo acrílico. Sendo a espessura da falange de  $e_1=10\text{mm}$  e da chapa da base  $e_2= 8\text{mm}$  com chapas do mesmo material (aço inox AISI 316L), com  $\sigma_0=170\text{ MPa}$  e  $E=193\text{ GPa}$ .

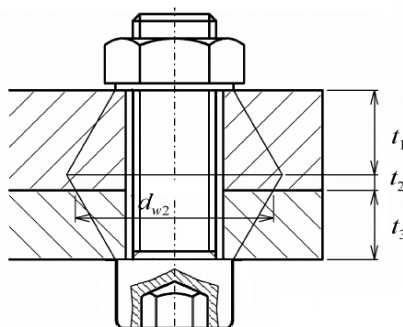


Fig. 25 – Esquema do tipo de junta a dimensionar.

Pressupondo a utilização de um parafuso CHC M8 todo roscado

Cálculo do comprimento do parafuso (L) <sup>[90][91]</sup>:

$$L = e_1 + e_2 + 0,9d + 2p = 27,7mm$$

O comprimento *standard* não inferior 27,7mm e mais próximo deste valor é o de L=30mm, será este o valor a considerar.

Para o cálculo da constante de rigidez do parafuso ( $k_p$ ) <sup>[90][91]</sup>:

Para um parafuso com d=8mm e p=1,55:  $A_t=36,6mm^2$

$$k_p = \frac{A_t \cdot E}{l_t} = 2,56 \times 10^8 \text{ N/m}$$

Cálculo da constante de rigidez das placas ( $k_m$ ) <sup>[90][91]</sup>:

-A junta é pressurizada, mas como o vedante está confinado na junta, este tem efeito desprezável no cálculo do  $k_m$ .

-Considerando  $\alpha=30^\circ$

$$k_{mi} = \frac{0,5774\pi Ed}{\ln \frac{(1,155t_i + d_{wi} - d)(d_{wi} + d)}{(1,155t_i + d_{wi} - d)(d_{wi} - d)}}$$

$$E = 193GPa$$

$$d_{w1} = d_k = 1,6 \times d = 1,6 \times 8 = 12,8mm$$

$$d_{w2} = 1,6 \times d + 2 \times 10 \text{tg } \alpha = 1,6 \times 8 + 2 \times 10 \text{tg } 30^\circ = 24,35mm$$

$$d_{w3} = 1,6 \times d = 1,6 \times 8 = 12,8mm$$

i	$t_i$ (mm)	$d_{wi}$ (mm)	$k_{mi}$ (N/m)
1	9	12,8	$1,91 \times 10^9$
2	1	24,35	$4,1 \times 10^9$
3	8	12,8	$1,91 \times 10^9$

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \Leftrightarrow k_m = 7,75 \times 10^8 \text{ N/m}$$

No cálculo do pré-esforço ( $F_i$ )<sup>[90][91]</sup> admitiu-se um:

Parafuso reutilizável:

$$F_i = 0,75 F_o$$

$$F_o = \sigma_o A_t$$

Para um parafuso da classe de resistência 5.6,  $\sigma_o=300$  MPa

$$F_i = 8235 N$$

Cálculo do coeficiente de segurança ( $C_s$ )<sup>[90][91]</sup>:

-Cálculo da força de tracção para uma pressão de 0,25bar (25KN/m<sup>2</sup>):

$$P = \frac{F}{A} \Leftrightarrow F = 1,8 KN$$

Assim:

$$F_i + \frac{k_p}{k_p + k_m} (C_s \cdot P) \leq A_t \sigma_o \Leftrightarrow C_s = 6$$

Os cálculos efectuados até ao momento só foi considerado um parafuso CHC M8x30, obtendo um coeficiente de segurança de 6 na ligação aparafusada. Mas uma vez que se trata de uma flange cilíndrica temos que multiplicar o número de parafusos. Sendo esta uma flange pressurizada é importante garantir uniformidade da pressão no vedante.

Se  $D_p$  for o diâmetro médio da linha de parafusos, deve-se usar um número elevado de parafusos na flange, limitado pela largura da chave de bocas<sup>[90]</sup>.

Como regra aproximada<sup>[90]</sup>,  $\frac{\pi D_p}{6d} \leq n_p \leq \frac{\pi D_p}{3d}$

Como  $D_p=328$ mm e  $d=8$ mm temos:  $21,47 \leq n_p \leq 42,94$

Escolhido o numero de parafusos,  $n_p=24$ , o coeficiente de segurança obtido para esta flange aparafusada ( $C_{sf}$ ) é de:  $C_{sf} = 144$

O factor de segurança obtido indica-nos que a junta se encontra claramente sobredimensionada, sendo este valor afectado directamente pelo número de parafusos. Poderíamos reduzir o número de parafusos, mas dada a necessidade de garantir uma pressão uniforme no vedante, é aconselhável o uso de um maior número de parafusos

possível. O número de parafusos (24) foi escolhido por se encontrar dentro do intervalo aconselhado e porque o ângulo entre os parafusos ser um valor inteiro (15°) de forma a facilitar o processo de maquinação.

Verificação da necessidade do uso ou não de anilhas <sup>[90][91]</sup>:

$$F_p = F_i + \frac{k_p}{k_p + k_m} \frac{N}{n_p} = 8253N$$

$$P_m = \frac{4F_p}{\pi(d_w^2 - d^2)} \leq \sigma_o$$

$$P_m = 106MPa \leq 170MPa$$

A relação  $P_m \leq \sigma_o$  verifica-se, como tal não é necessário o uso de anilhas.

Dada a semelhança entre as restantes juntas aparafusadas e a pressão no interior ser pequena, será utilizado em todas elas 24 parafusos CHC M8x30 da classe 5.6, com uma pré carga de 8,235KN.

### ***3.1.2. Mecanismo de Agitação***

De forma a efectuar um dimensionamento mais próximo da realidade, será necessário um estudo hidrodinâmico do interior de cada coluna. No entanto, uma vez que esse estudo não é objecto deste trabalho, o dimensionamento dos elementos mecânicos será efectuado com base em vários pressupostos, com base em condições limite.

Dado que o volume de cultura a agitar se encontrar confinado entre tubo exterior e o tubo interior, é necessário um design que permita um correcto funcionamento sem que o tubo interior interfira no mecanismo de agitação (Fig. 26).

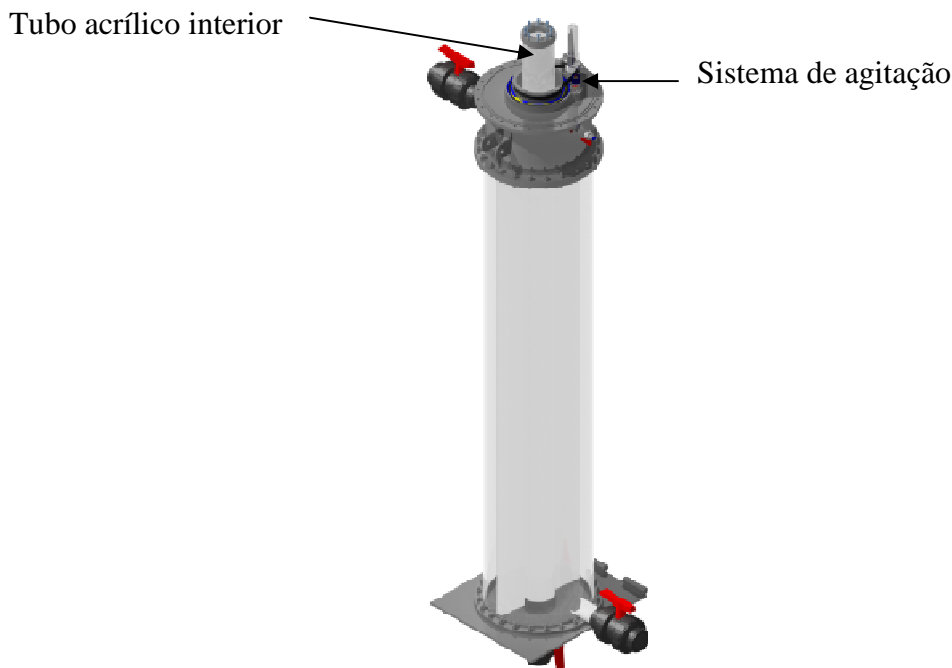


Fig. 26 - Assemblagem Base, Tubo acrílico exterior, Ligação superior, tubo interior e sistema de agitação.

### 3.1.2.1. Cálculo da potência de accionamento

Considerando uma velocidade máxima de agitação de 60 rpm, a energia cinética necessária para colocar o volume de fluido em movimento, pode ser calculada através do cálculo da energia cinética,  $E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ . A velocidade linear máxima do fluido no interior do tubo é verificada na periferia do tubo ( $r=0,146m$ ), e toma o valor de  $v = 1,8347 \frac{m}{s}$ .

O volume de cultura a agitar encontra-se limitado pelo diâmetro exterior do tubo interior (90mm) e o diâmetro interior do tubo exterior (292mm), com uma altura de 1500mm, o faz um total de  $0,0606m^3$ . Desprezando o peso próprio do mecanismo, uma vez que é bastante inferior (4Kg) à massa de água a movimentar, sabendo  $\rho_{H_2O} = 1000 \frac{Kg}{m^3}$ , temos uma massa de 60,6Kg. Obtendo assim  $E_c = 101,99J$ .

Para o cálculo da potência necessária, para accionar o mecanismo considerou-se;

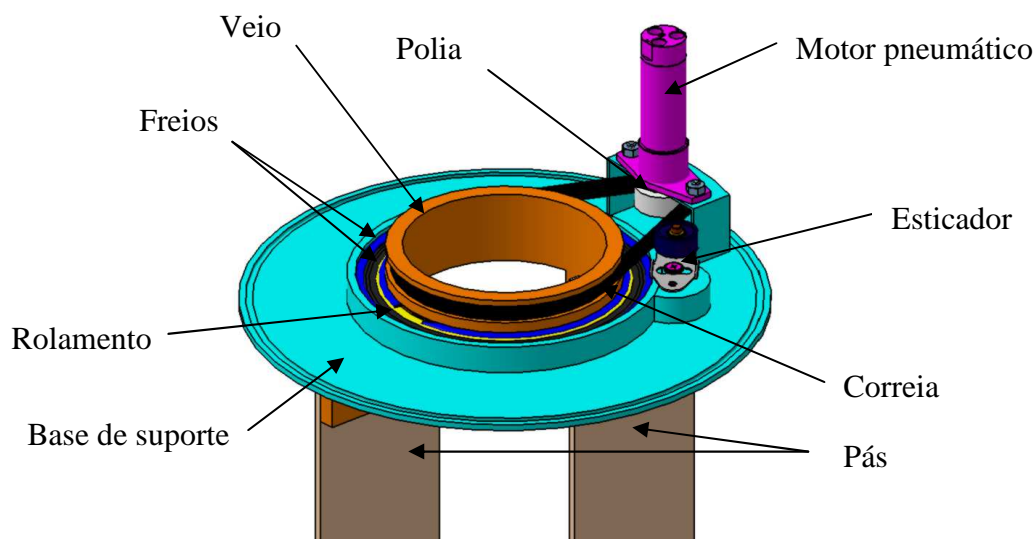
-Tempo de arranque de 1 segundo, até ser estabelecida a rotação máxima (60 rpm),

assim temos:  $P = \frac{E_c}{t} = 101,99W$

O binário a aplicar no veio, para  $n=60\text{rpm}$ , será:  $B = 16,232N \cdot m$

### 3.1.2.2. *Design e selecção de componentes*

Para que o tubo interior não interfira com o mecanismo de accionamento das pás, a solução criada foi utilizar um veio perfurado, permitindo caso necessário retirar o tubo interior sem desmontar o mecanismo de agitação. A figura 33 apresenta o sistema desenvolvido (ver Anexo I). O binário transmitido ao veio de rotação, ao qual estão ligadas as pás, provém de um motor pneumático, através de um sistema de transmissão por correia. Dado grande diâmetro do veio (130mm) optou-se por maquinar a própria polia no mesmo.



**Fig. 27 – Mecanismo de agitação projectado.**



Os critérios usados na selecção do rolamento foram:

- Diâmetro do veio;
- Capacidade para suportar o peso do veio e das pás;
- Compatibilidade química do material com o meio corrosivo;
- Lubrificação.

Tendo em conta estes critérios o rolamento seleccionado foi o rolamento de esferas em aço inox, selado e auto lubrificado com a referência 61828-2RS1 comercializado pela SKF <sup>[92]</sup> (Anexo II).

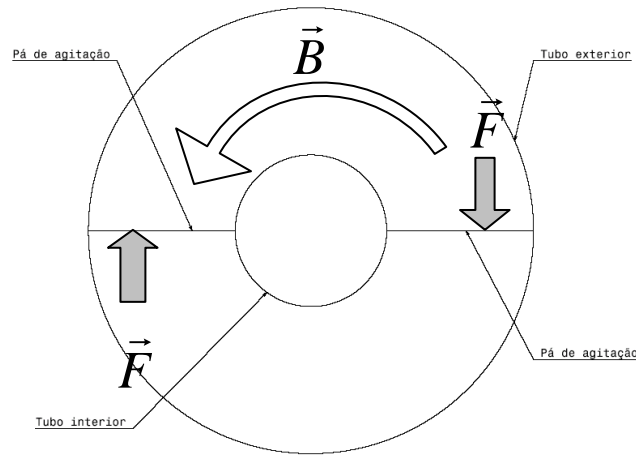
Dado o ambiente corrosivo a escolha do motor pneumático recai sobre a gama de motores em aço inoxidável. Com base na potência necessária e considerando uma relação de transmissão de 4, a escolha recai sob o motor pneumático em aço inoxidável isento de lubrificação com a ref. LZB 14RL AR005-11, comercializado pela Atlas Copco <sup>[93]</sup> (Anexo II).

Tendo em conta o motor seleccionado, a rotação, a potência a transmitir e o meio corrosivo onde irá operar foi seleccionada a polia em aço inox do tipo Poly-V com a ref. PY B035J4, e a correia Poly-V com a ref.-220J, ambos artigos comercializados pela Naismith Engineering & Manufacturing Co <sup>[94]</sup> (Anexo II). De forma a manter a correia sempre tensionada foi seleccionado o esticador com estrutura em aço inox e rolete em nylon com a ref. SP4LB Comercializado pela York Industries <sup>[95]</sup>.

### ***3.1.2.3. Análise estrutural***

Para efeito de análise estrutural, são consideradas duas pás opostas cuja largura (202mm) é a distância entre os tubos na qual está confinada a cultura, com altura de 1500mm (igual à altura da coluna de cultura) e espessura 5mm. Esta disposição das pás para a simulação estrutural corresponde à situação limite ao nível da resistência do fluido nas faces das pás. O facto de serem escolhidas duas pás permite minimizar vibrações e esforços indesejáveis

no mecanismo, mantendo assim o sistema de forças equilibrado. A Fig. 28 apresenta um esquema de topo da disposição adoptada para a simulação estrutural.



**Fig. 28 – Representação do binário exercido nas pás.**

Mantendo a filosofia de dimensionamento em condições limite, as pás encontram-se na posição vertical, normais à superfície do tubo interior com um ângulo de  $180^\circ$  entre elas. Esta configuração não é funcional do ponto de vista hidrodinâmico pretendido na realidade, uma vez que irá dar origem a uma força centrífuga, que fará com que os microrganismos se concentrem na parede do tubo exterior, impedindo que a luz chegue aos microrganismos mais no interior (foto inibição), quando o pretendido, é criar ciclos de vai-e-vem para que todas as células recebam luz. Como já foi referido, idealmente para obter o efeito hidrodinâmico desejado será necessário um estudo para definir a geometria de pás mais adequada. Tal estudo não faz parte do presente trabalho, no entanto para realizar a simulação de esforços limite a configuração apresentada na figura 33 é a mais indicada.

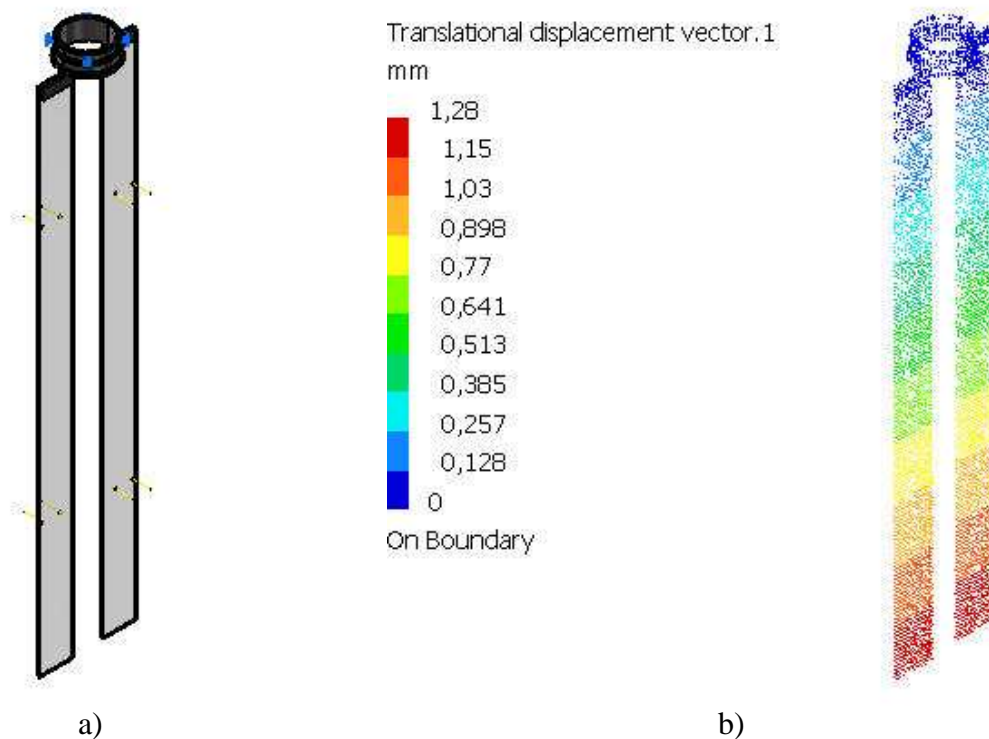
As reacções exercidas nas pás estão representadas na figura 33 e podem ser obtidas através da seguinte relação:  $B = 2F \times b$ , considerando  $b$  como sendo a distância do centro do tubo ao centro da pá, temos:  $F = 85N$ .

Desta forma a simulação realizada tem como objectivo estudar a flecha das pás e as tensões geradas no mecanismo.

Considerações:

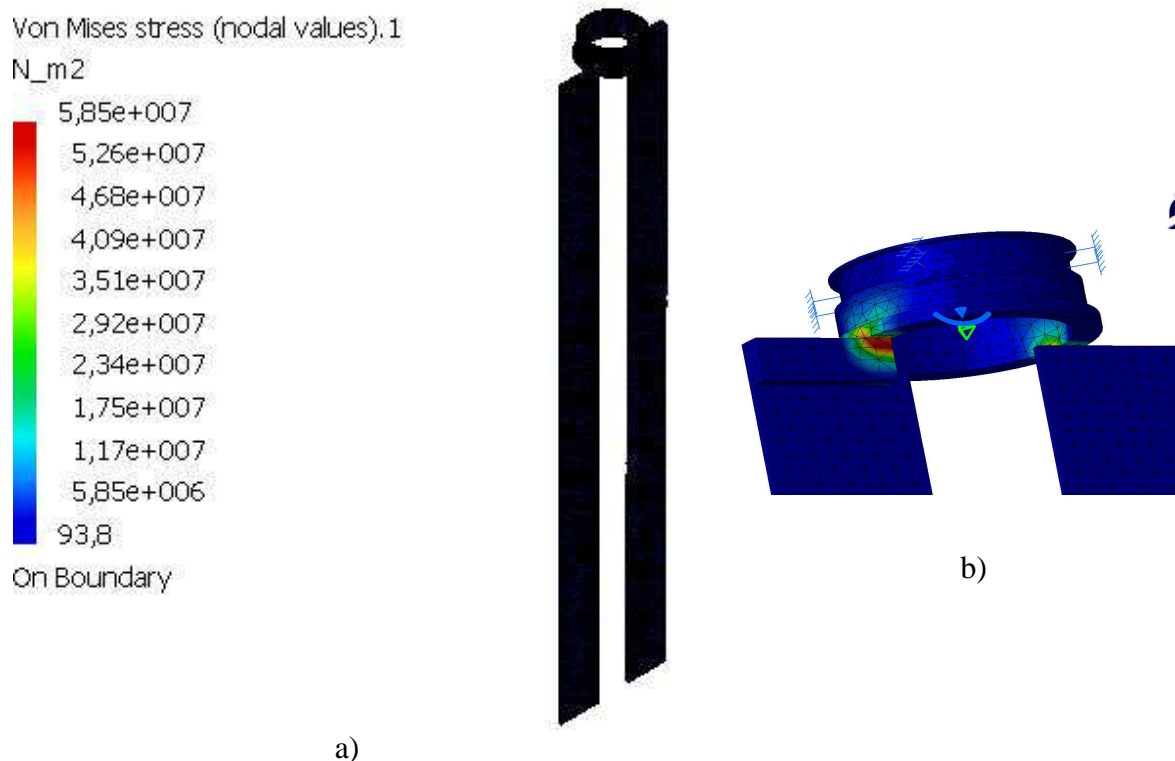
- as pás de acrílico encontram-se rigidamente ligadas ao veio de rotação,
- o veio de rotação é estático,
- força F é aplicada em ambas as pás.

O tipo de malha usado na simulação foi tetraédrica linear de tamanho 10mm e desvio absoluto 5mm, obtendo-se um total de 8206 nós e 22667 elementos. Os resultados obtidos encontram apresentados nas figuras 34 e 35.



**Fig. 29 – a) Pontos de fixação e aplicação de carga, b) campo de deslocamentos.**

O deslocamento máximo obtido na simulação é de 1,28mm, não sendo este um valor preocupante no processo de agitação. Não pondo em causa a integridade dos restantes componentes da coluna.

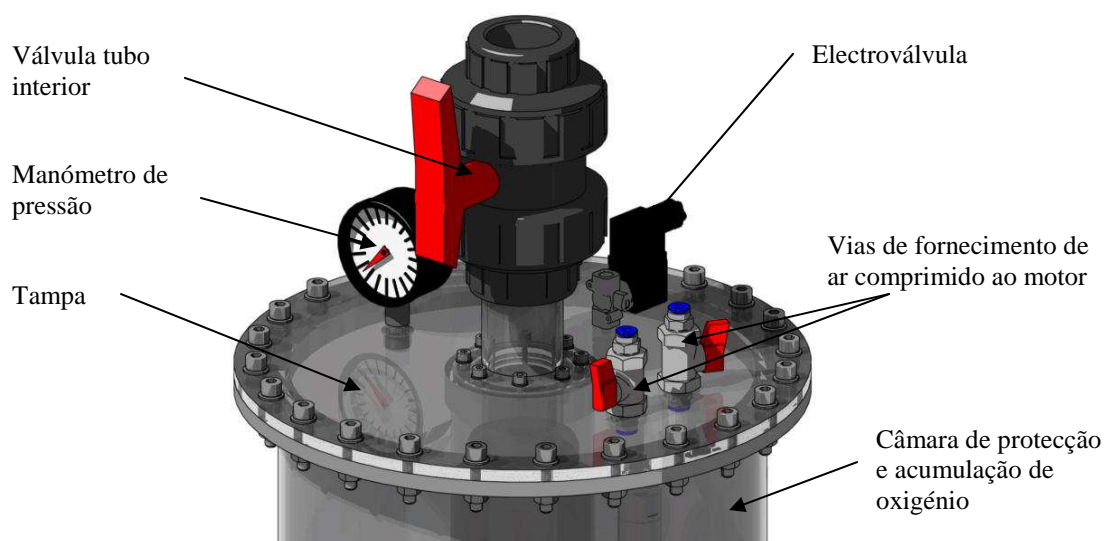


**Fig. 30 – a) Campo das tensões equivalentes de Von Mises, b) Pormenor da zona mais afectada.**

Nas condições de trabalho supostas, o material fica submetido a uma tensão máxima de apenas 58,5MPa, valor este muito aquém da tensão de cedência do aço inox AISI 316L (170MPa).

### ***3.1.3. Parte superior da coluna***

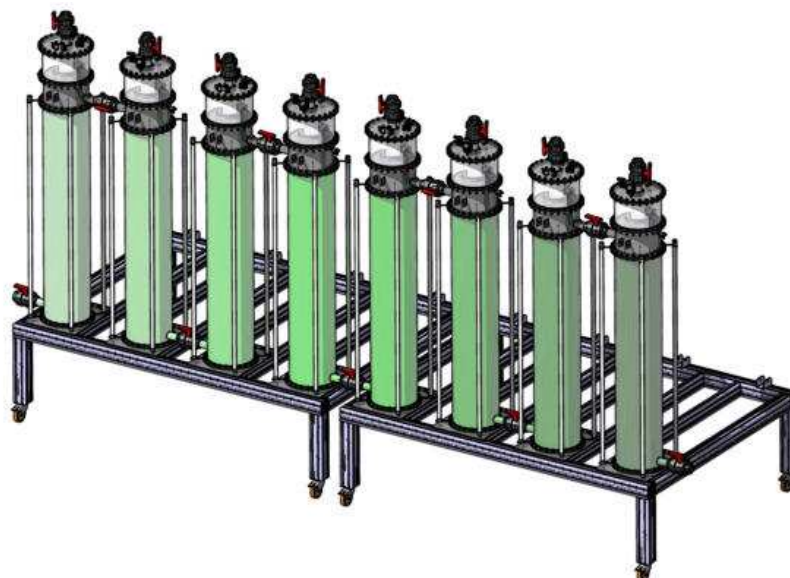
A parte superior do fotobiorreator é composta por um tubo acrílico acoplado à junta superior, permitindo a protecção e controlo visual do mecanismo de agitação. É também neste espaço que será acumulado o oxigénio proveniente da reacção fotossintética, que será extraído periodicamente através de uma electroválvula localizada na tampa da coluna. Para além da electroválvula, na tampa está também localizado um manómetro de pressão, para controlo da pressão na coluna, as vias de fornecimento de ar comprimido ao motor pneumático, e a válvula de segurança do tubo interior.



**Fig. 31 – Parte superior da coluna.**

### ***3.1.4. Iluminação***

O fotobiorreator projectado pode operar com iluminação artificial (lâmpadas fluorescentes), iluminação natural ou ambas. Numa primeira fase o protótipo irá operar em laboratório com iluminação artificial (Fig. 32). No entanto, este encontra-se preparado para operar com iluminação natural, possuindo um sistema de inclinação que permite um maior aproveitamento da luz solar (Fig. 33). Tendo em conta que para um ângulo de incidência da luz solar no acrílico superior a  $72^\circ$  toda a luz é reflectida <sup>[22]</sup>. O ângulo de inclinação é variável dependendo da localização geográfica e das condições climáticas. O ideal seria possuir um sistema de posicionamento automático para orientar o fotobiorreator em relação aos raios incidentes, ao longo do dia, de forma a otimizar a eficiência da iluminação. Um mecanismo deste tipo iria, contudo encarecer a tecnologia, pelo que esta solução não será desenvolvida nesta dissertação.



**Fig. 32 – Fotobiorreactor colunas verticais com sistema de iluminação artificial.**



**Fig. 33 – Fotobiorreactor com colunas inclinadas para melhor aproveitamento da luz natural.**

O fotobiorreactor projectado encontra-se dimensionado para funcionar normalmente até uma inclinação máxima de  $45^\circ$ , de forma a permitir um maior aproveitamento de radiação solar. Este valor foi definido como base no estudo do ângulo médio da radiação solar ao longo do ano para as coordenadas geográficas de Aveiro (latitude  $40,62^\circ\text{N}$ , longitude:  $8,66^\circ\text{O}$ )<sup>[83]</sup>.

### 3.2. Análise energética

Para realização do estudo energético será considerada a espécie *Chlorella vulgaris*, uma vez que é uma espécie cientificamente bem caracterizada, robusta e com elevado potencial para produção de óleo. Foram contemplados diferentes cenários de teor de lípidos para esta espécie conforme os indicados na Tabela 13.

**Tabela 13 – Vários cenários do conteúdo de lípidos e poder calorífico da espécie *Chlorella vulgaris* [20][58]**

	<i>Chlorella vulgaris</i> meio Watanabe <sup>[58]</sup>		<i>Chlorella vulgaris</i> Meio pobre em Azoto	
Lípidos (%)	18	28	40	58
Poder Calorífico [KJ/g]	18	21	23	28

De notar que o teor de lípidos, de muitas espécies de microalgas quando cultivadas em meio carente num ou noutro elemento químico, aumenta consideravelmente. Neste caso considerou-se o meio *Watanabe*, considerado completo relativamente aos nutrientes, e um meio deficiente em azoto.

Para o cálculo da fracção da eficiência tecnológica ( $F_{\text{tecnológico}}$ ) foi tido em conta os seguintes valores:  $Q_{\text{ct}}=0.92$  <sup>[71]</sup>,  $Q_{\text{lp}}=0.95$  <sup>[22]</sup>,  $Q_{\text{sombra}}=0.90$  (considerando um sombreamento de 10%),  $Q_{\text{reft}}=0.88$  <sup>[71]</sup>,  $Q_{\text{processo}}=0.81$  (90% na recolha de biomassa e 90% na extracção do óleo),  $Q_{\text{disp}}=0.75$  (considerando 20% paragens e/ou manutenção),  $Q_{\text{tec}}=0.98$ , substituído na equação ( 8) (capítulo II), temos  $F_{\text{tecnológico}}=0.41$ .

O valor obtido para o  $F_{\text{tecnológico}}$  reflecte a utilização dos materiais seleccionados e das soluções propostas para o projecto mecânico. O valor obtido para a eficiência máxima alcançável ( $Q$ ) depende das variáveis relacionadas com biologia das microalgas ( $F_{\text{biológico}}$ ). Para efeito de estudo não foram contemplados os diferentes valores de cada uma das variáveis referentes ao  $F_{\text{biológico}}$  mas sim três cenários distintos para a eficiência máxima alcançável, conforme a Tabela 14 .

Sendo o valor de  $F_{\text{biológico}}$ , um valor fixo, para obter diferentes cenários da máxima eficiência alcançável ( $Q$ ), o parâmetro a variar será o  $F_{\text{biológico}}$ , uma vez que o valor da eficiência máxima teórica é fixo ( $Q_{\text{teo}}$ ). Assumindo os vários valores de 6, 8 e 10% de eficiência máxima alcançável <sup>[22]</sup>, sendo este último um valor assumidamente inflacionado <sup>[22]</sup>, podemos obter o valor de  $F_{\text{biológico}}$  para os cenários considerados (equações ( 5)( 6)).

**Tabela 14 – Cálculo para o  $F_{\text{biológico}}$  e F do fotobiorreactor projectado para as várias eficiências (Q) consideradas.**

Q [%]	$F_{\text{biológico}}$	F
6	0,54	0,22
8	0,72	0,30
10	0,90	0,37

Tendo como base dados da bibliografia especializada consultada verifica-se que não existe consenso em relação aos fotoperíodos para cultura da espécie de microalga *chlorella vulgaris*, este aspecto poderá estar relacionado ao facto de diferentes grupos de investigação utilizarem diferentes condições de cultura e soluções laboratoriais <sup>[58][53]</sup>. Logo é difícil comparar os resultados obtidos em diferentes laboratórios. Para efeito de cálculo serão considerados o fotoperíodo de 12h de luz (12 de sombra) <sup>[96]</sup> por ser um período médio, o fotoperíodo de 16 horas de luz (8 de sombra) <sup>[20][97][98]</sup> e uma situação de aproveitamento total de iluminação natural <sup>[53][54]</sup>.

Sabendo o PAR <sup>[99]</sup> e a área do fotobiorreactor exposta à radiação ( $5,5\text{m}^2$ ) obtemos o valor da potência instalada, que multiplicada pelo tempo do fotoperíodo dá-nos a energia luminosa ( $E_{\text{PAR}}$ ) capturada para conversão em energia química. Essa energia é fornecida totalmente pelo sol ou artificialmente com lâmpadas fluorescentes, caso o período de radiação solar seja inferior ao fotoperíodo considerado. No cálculo do balanço energético apenas a energia artificial é contabilizada, uma vez que a energia solar se encontra disponível gratuitamente. Há que salvaguardar que esta energia artificial integra já um factor de eficiência das lâmpadas fluorescentes (70%) e não contempla as fracções energéticas de operação e de extracção de óleo.

Foi realizado um estudo sobre o número de horas de radiação solar diária ao longo do ano para as coordenadas geográficas da cidade de Aveiro (latitude:  $40,62^\circ\text{N}$  e longitude:  $8,66^\circ\text{O}$ ), recorrendo à aplicação *Sun Shadow Applet* <sup>[83]</sup> (Anexo III).

Os resultados do balanço energético são expressos em termos de diferença entre a energia obtida no óleo produzido e a energia introduzida artificialmente no processo. Para tal consideram-se os vários conteúdos lipídicos da biomassa (Tabela 13), utilizando a equação (3) (capítulo I), sabendo que a energia obtida na biomassa é igual ao produto do seu poder calorífico  $P_{\text{cb}}$  pela quantidade de biomassa produzida (M), temos:



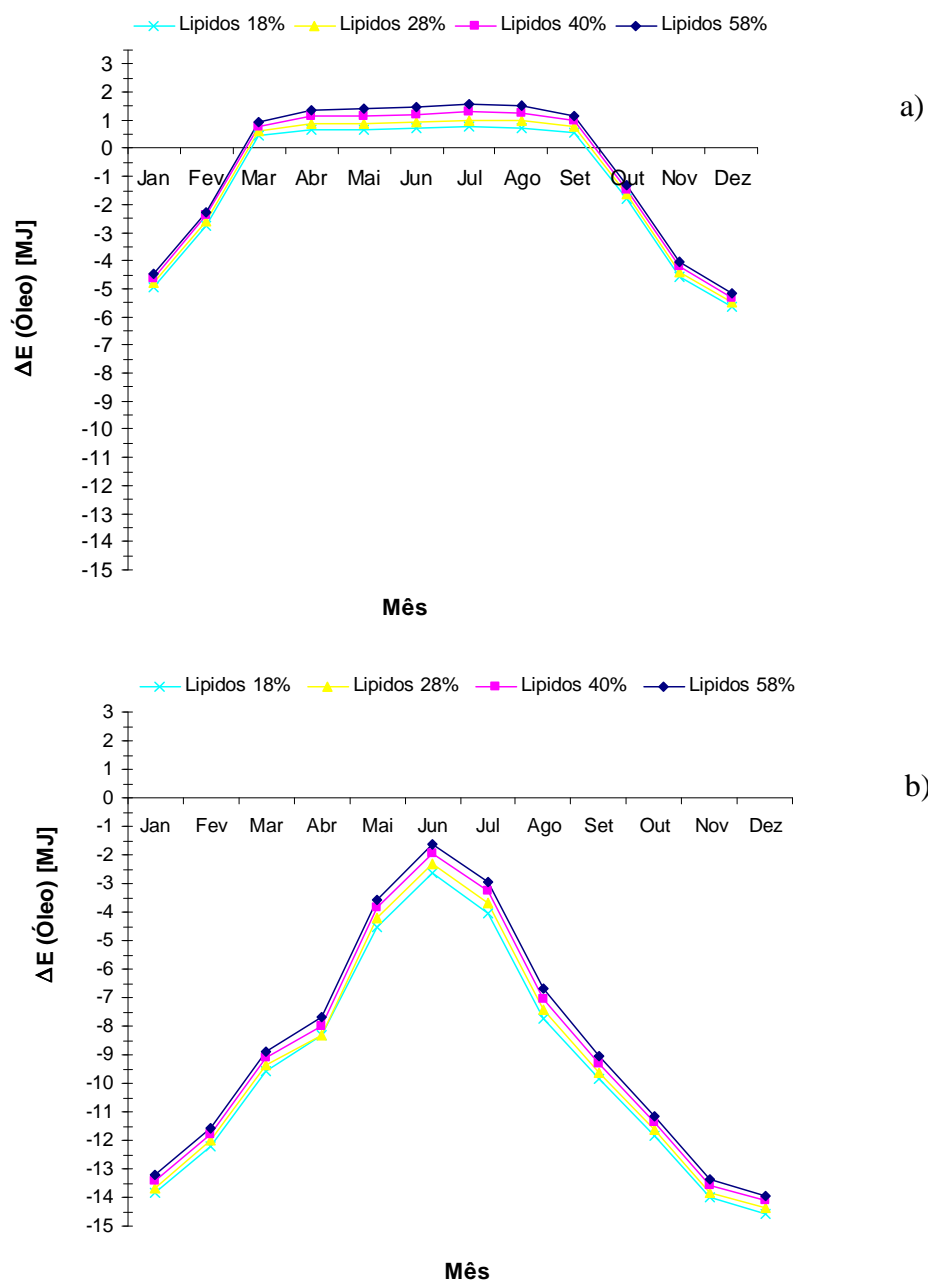
$$E_B = P_{C_b} \cdot M \quad (12)$$

Substituindo a equação (12) na equação (3), podemos calcular uma estimativa para a quantidade de biomassa produzida, sabendo o poder calorífico da biomassa ( $P_{C_b}$ ) (Tabela 13), a energia luminosa disponível ( $E_{PAR}$ ) e a eficiência máxima do processo ( $Q$ ) (Tabela 14):

$$M = \frac{E_{PAR} \cdot Q}{P_{C_b}} \quad (13)$$

Calculada a quantidade de biomassa produzida ( $M$ ), conhecendo o valor da percentagem de lípidos associado aos diferentes cenários considerados, calculamos o valor da quantidade de óleo extraído. Que por sua vez multiplicado pelo seu poder calorífico (37,7KJ/g) temos a energia contida no óleo extraído  $E_{óleo}$ . No anexo III encontram-se os resultados obtidos para a média de biomassa produzida diariamente em cada mês do ano, bem como a quantidade de óleo extraída, para os vários cenários considerados, ao nível do teor de lípidos, da eficiência máxima alcançável e fotoperíodo.

Considerando o fotoperíodo de 12h para cultura de *Chlorella vulgaris* podemos verificar que o período de radiação solar fotossintética diária nos meses de Janeiro, Fevereiro, Outubro, Novembro e Dezembro é inferior ao fotoperíodo pretendido (Anexo III). Como tal, é necessário compensar a luz recorrendo à iluminação artificial de forma a completar o fotoperíodo. Deste modo o balanço energético nestes meses ser negativo como ilustra a Fig. 34a).



**Fig. 34 - Balanço energético ( $\Delta E (\text{Óleo}) = E_{\text{Óleo obtido}} - E_{\text{artificial iluminação}}$ ), para  $Q=6\%$  com fotoperíodo de 12h (a), e fotoperíodo de 16h (b).**

Analisando os resultados obtidos na Fig. 34a, verificamos que para uma eficiência ( $Q$ ) de 6% e fotoperíodo de 12h o processo é energeticamente viável apenas nos meses em que o período de radiação solar é igual ou superior ao fotoperíodo, não havendo necessidade de recurso a iluminação artificial. Já à medida que aumentamos o valor da eficiência (8 e 10%) o balanço energético melhora (consultar Anexo III).

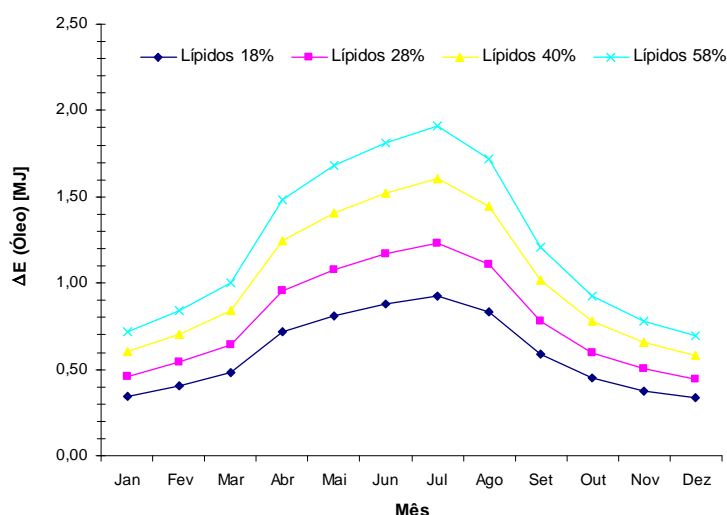
Já para o fotoperíodo de 16h, o cenário obtido não é tão animador (Fig. 34b), apresentando um balanço negativo ao longo do ano, precisamente devido ao facto do período de radiação

solar máximo (15h) ser inferior ao fotoperíodo (16h) (Anexo III) e ser necessária iluminação artificial todo o ano.

O balanço realizado indica que a produção de biomassa a partir de microalga não é viável do ponto de vista energético para fotoperíodos que necessitem de iluminação artificial (Fig. 34). O aumento da eficiência máxima alcançável em 4% não permite inverter a situação do balanço energético (Anexo III).

É de salientar que o valor de  $Q=10\%$  implica uma eficiência do factor biológico de 90%, o que representa um desafio enorme e difícil de alcançar.

Dos resultados obtidos, não restam dúvidas do ponto de vista energético o melhor cenário é para o fotoperíodo de 12h. No entanto o ideal, será operar recorrendo única e exclusivamente à iluminação natural. Assim o balanço energético é positivo ao longo de todo o ano, e corresponde à energia obtida da quantidade de óleo produzida ( Fig. 35). Contudo esta abordagem levanta outro tipo de questão quanto à sua exequibilidade, em termos biológicos, pois teríamos o fotoperíodo a variar anualmente entre o valor mínimo de 9h e máximo de 15h de luz solar.



**Fig. 35 - Balanço energético, para  $Q=6\%$  apenas com iluminação natural.**

Da análise da Fig. 35, podemos considerar dois semestres, um de menor produtividade (de Outubro a Março) e outro de maior produtividade (de Abril a Setembro). A quebra de produção do semestre de maior produtividade para o menor é de 50%. Para que o processo

se mantenha energeticamente viável nos meses de Outubro a Março, a energia necessária à operação, deve ser inferior à energia obtida em óleo nesse semestre de menor produtividade. Este factor é de extrema importância na selecção dos equipamentos para uma produção em grande escala.

### ***3.3.Scale-up***

Devido à quantidade de electricidade requeria para operar a uma escala industrial e aos custos que lhe estão associados, apenas alguns produtos derivados das microalgas (produtos de valor acrescentado, como por exemplo pigmentos, antioxidantes, óleos essenciais) poderão ser produzidos a preços competitivos com recurso a iluminação artificial <sup>[100]</sup>. O uso de energia solar é obviamente a solução mais racional, devido à sua abundância e à ausência de custo. No entanto, é necessário um método de forma a rentabilizar essa energia. Essa rentabilização parte essencialmente duma correcta orientação dos fotobiorreactores em relação à radiação solar incidente, da disposição dos mesmos na área instalada, bem como da escolha correcta dos materiais aplicados, de forma a aumentar a otimizar a produtividade por unidade de área.

Uma melhor orientação e disposição em relação à radiação solar pode ser obtida através do estudo do sombreamento da área instalada. Para tal foi efectuado um estudo com base nas características do percurso solar para a localização geográfica de Aveiro. As coordenadas do sol ao longo do presente ano obtidas com recurso à aplicação *Sun Shadow Applet* <sup>[83]</sup>. Os cenários considerados, foram seleccionados com base no ângulo de elevação do sol. Sendo o ângulo máximo verificado para o dia 21 de Junho, com o valor de 72,8°, e mínimo para o dia 21 de Dezembro, com o valor de 25,9° (valores para o ano 2008). Sabendo os valores do ângulo de elevação e do ângulo azimute aplicando as equações ( 9),( 10) e ( 11) (capítulo II) obtemos as coordenadas cartesianas da posição solar, permitindo efectuar uma simulação da sombra projectada.

**Tabela 15 – Cenários seleccionados para a simulação.**

Inclinação mínima de 25,9° no dia 21 de Dezembro		
Hora [h:min]	Elevação (h) [°]	Azimute (A) [°]
8:00	0	90
9:30	13,1	76,9
11:00	22,4	67,6
12:33	25,9	64,1
Inclinação máxima de 25,9° no dia 21 de Junho		
8:00	30,5	59,5
9:30	47,5	42,5
11:00	63,5	26,5
12:36	72,8	17,2

Foi criada hipoteticamente uma célula com 4 fotobioreactores dispostos paralelamente. Foram realizadas simulações (CATIA V5R17), com vista a definir a melhor disposição das colunas do fotobiorreator, cujos resultados se encontram na Tabela 16 e Tabela 17. O critério usado na determinação das distâncias entre colunas foi o comprimento da sombra projectada, e dimensões mínimas para um corredor de manutenção. Para tal as distâncias foram determinadas com base no pior cenário, que se verifica a 21 de Dezembro como podemos constatar nos resultados.

Tabela 16 – Sombreamento na configuração vertical.

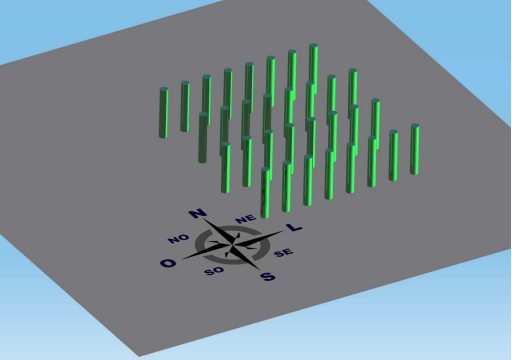
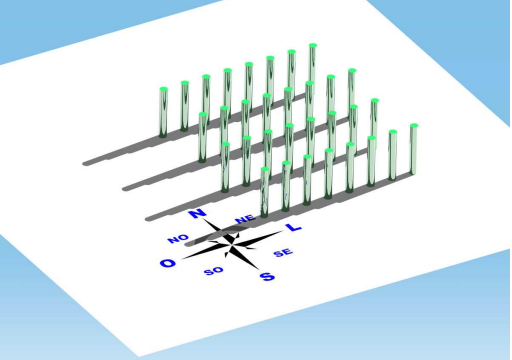
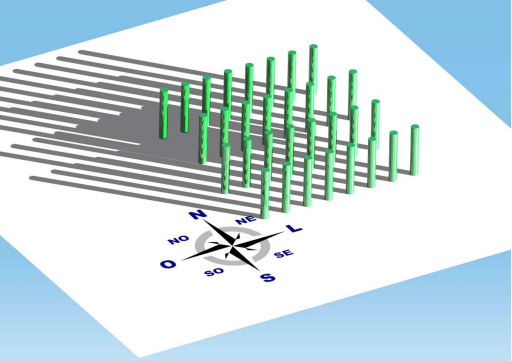
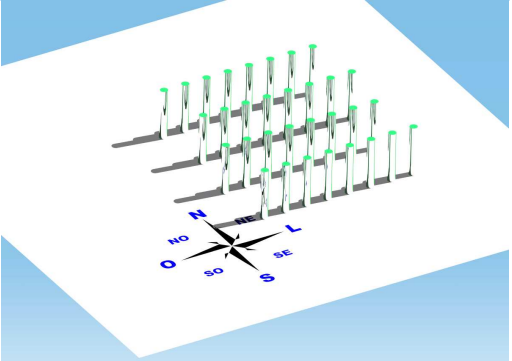
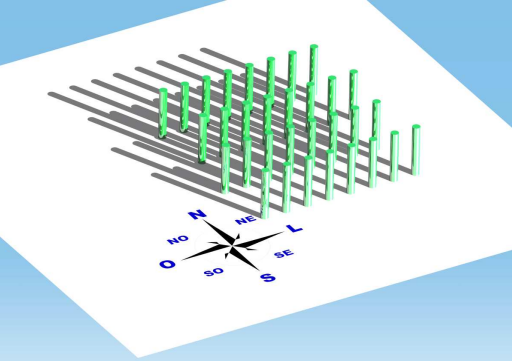
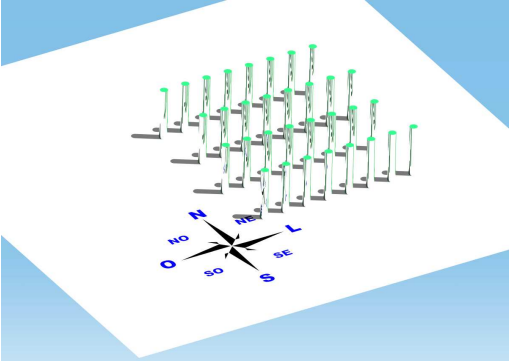
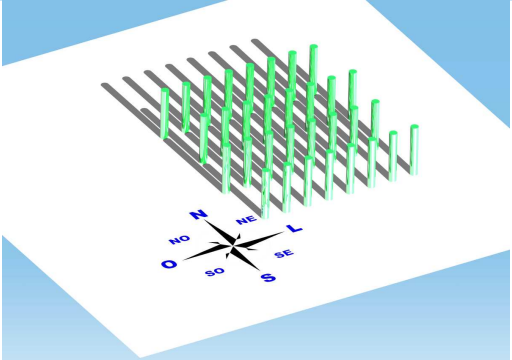
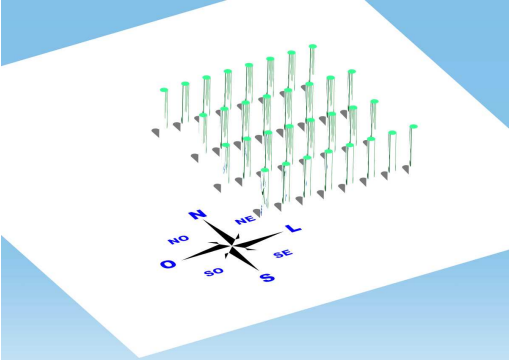
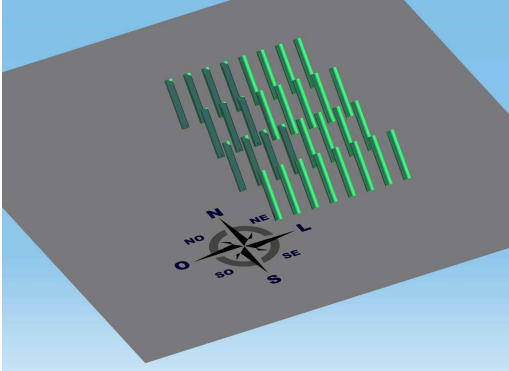
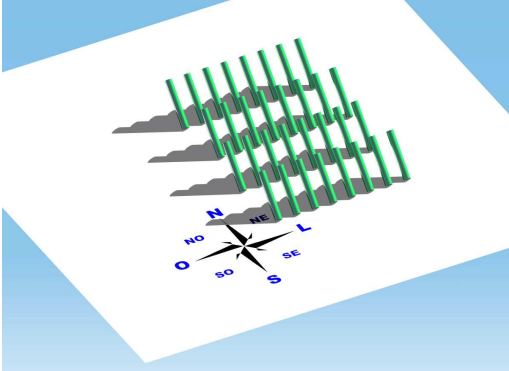
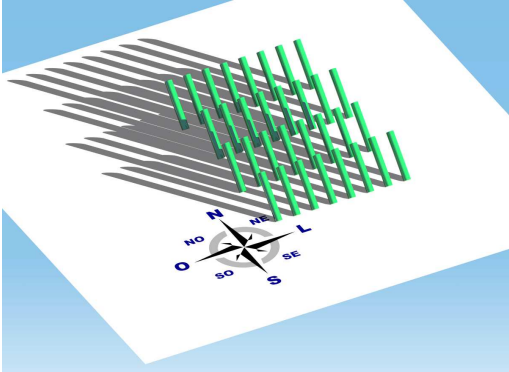
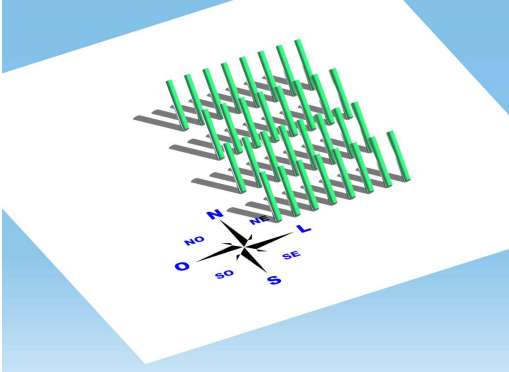
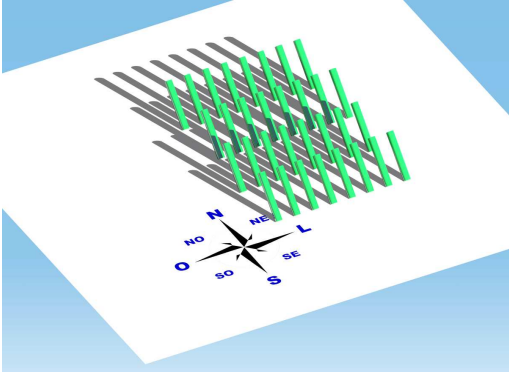
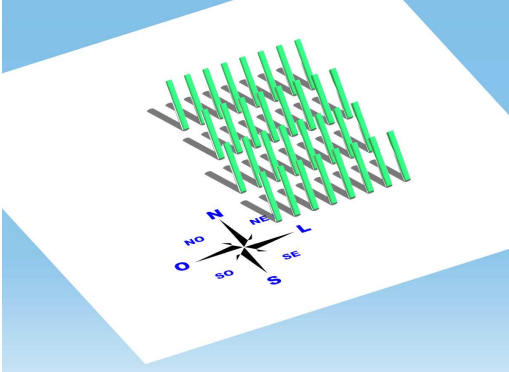
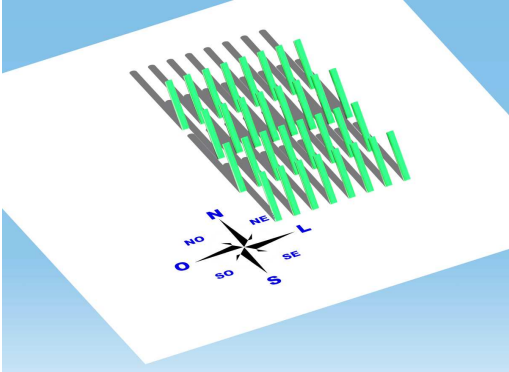
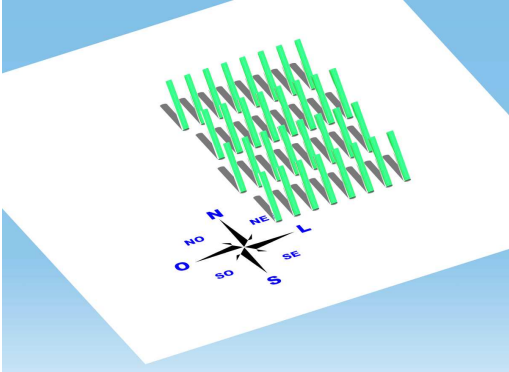
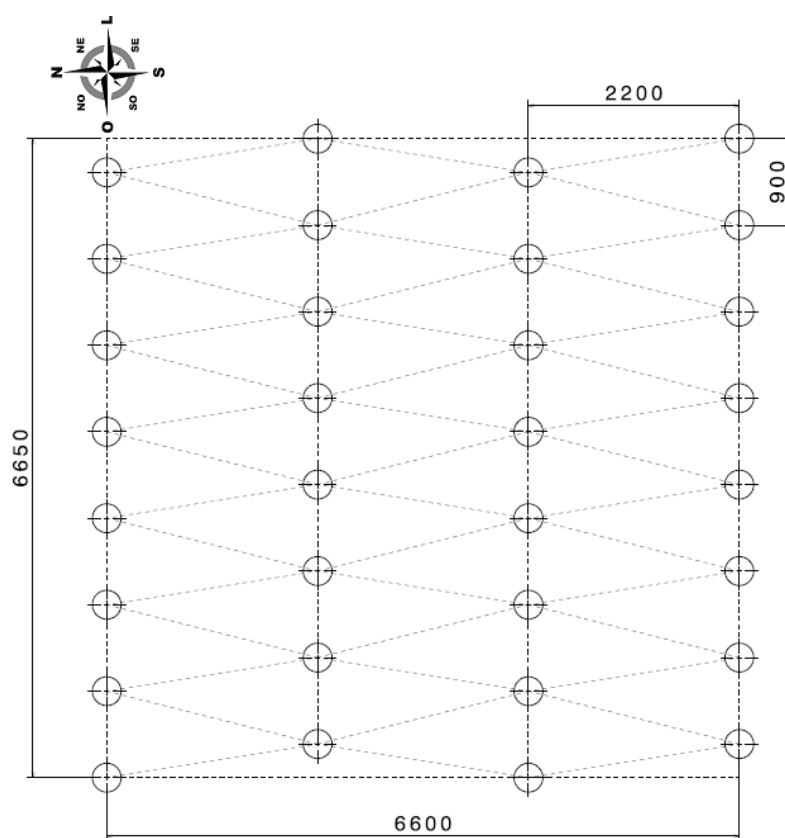
Hora [h:min]	Dia 21 de Dezembro	Dia 21 de Junho
8:00		
9:30		
11:00		
12:33/ 12:36		

Tabela 17 – Sombreamento na configuração inclinada.

Hora [h:min]	Dia 21 de Dezembro	Dia 21 de Junho
8:00		
9:30		
11:00		
12:33/ 12:36		

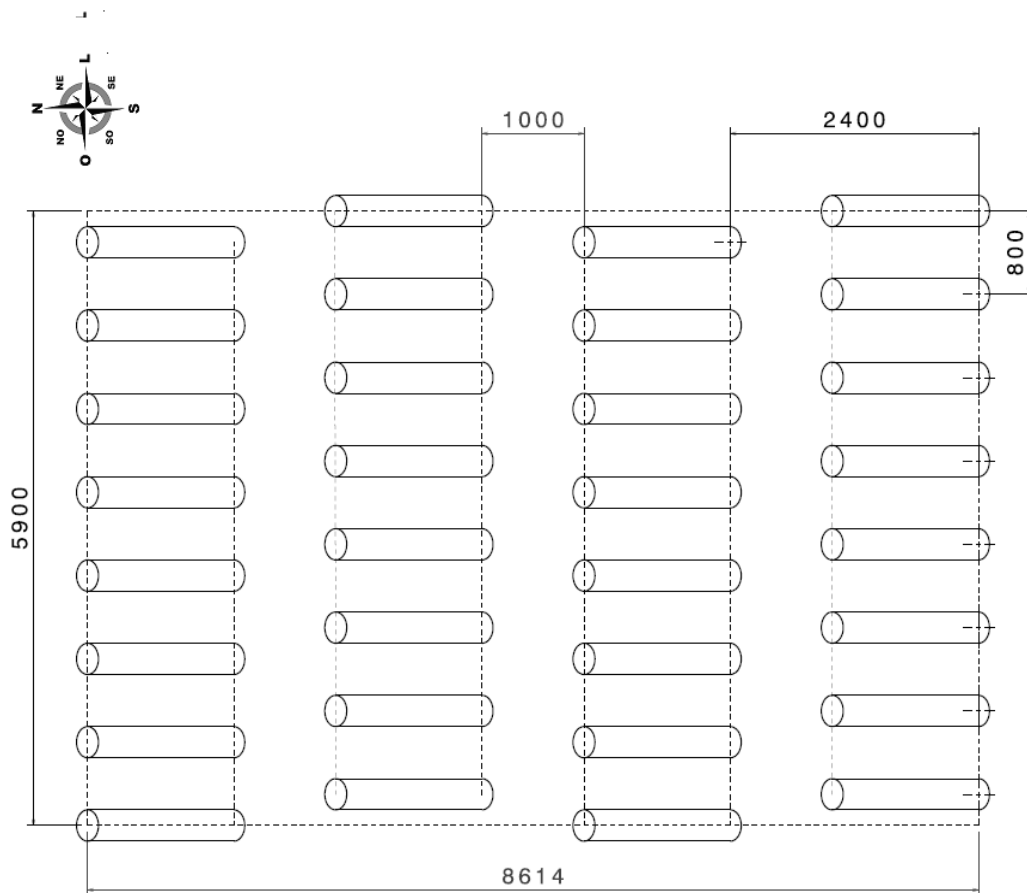
Como podemos verificar a configuração inclinada é a que apresenta melhores resultados em relação ao sombreamento, especialmente à medida que o ângulo de elevação do sol aumenta, no entanto a área necessária para este tipo de configuração é maior, tendo uma menor produtividade por área, (assumindo que para o mesmo número de tubos em diferentes configurações a produção é igual).

Os resultados obtidos para a disposição das colunas em cada célula (32 colunas) encontram-se na Fig. 36 e Fig. 37.



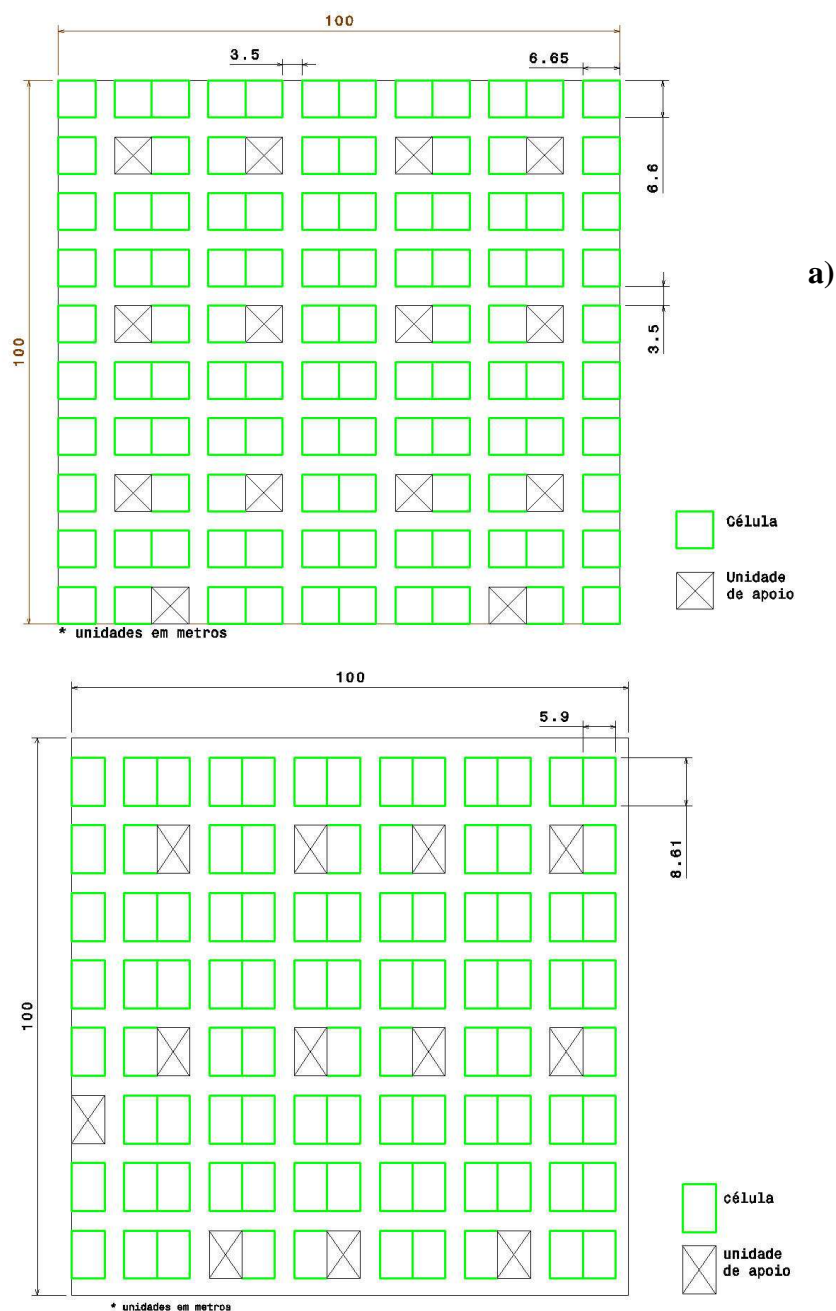
**Fig. 36 – Vista de topo da célula de colunas na configuração vertical.**





**Fig. 37 – Vista de topo da célula de colunas na configuração inclinada.**

Conhecidas as dimensões necessárias para a instalação de uma célula, o cálculo da produtividade por área instalada não pode ser efectuado tendo apenas como base estes valores, pelo que para uma melhor aproximação à realidade são sugeridos dois *layouts* (Fig. 38), um para a configuração vertical e outro para a configuração inclinada, para uma área instalada de 1ha. Para a realização de um layout é necessário ter presente uma análise de custos, devido aos elevados custos que lhe estão associados quando comparados com outras culturas de matéria-prima para produção de biodiesel, no entanto para objecto de estudo da presente dissertação tal análise não será realizada. Sendo os *layouts* sugeridos com base na área de suporte ao funcionamento das células (bombas, tubagens, tanques, centrifuga), bem como a área de manutenção, tendo sido considerados corredores de 3,5 metros de largura para livre-trânsito de um veículo de mercadorias.



**Fig. 38 – Layouts sugeridos para a configuração vertical (a) e para a configuração inclinada (b).**

Conhecido o número de células por área instalada, pode-se efectuar uma estimativa para a produção. Para tal foram considerados os resultados obtidos no cálculo energético efectuado no subcapítulo anterior (Tabela 18, ver Anexo III).

Será considerado um fotoperíodo de 12h, e considerando o cenário de eficiência máxima alcançável (Q) mais referenciado na bibliografia consultada (Q=6%), pelo que da análise energética realizada no subcapítulo anterior, podemos considerar os resultados da produção

de óleo diária expressos na Tabela 18, considerando um período de cultura da espécie microalga *Chlorella vulgaris* de Março a Setembro, (sendo este o período com maior média). Não pondo de parte a possibilidade da instalação operar nos restantes meses, até porque o pior cenário contemplado para determinação da disposição das colunas foi nesse período, seria nesse caso necessário averiguar se a cultura da espécie *Chlorella vulgaris* será rentável do ponto de vista energético e económico, devido ao facto do fotoperíodo nesse espaço de tempo ser inferior ao considerado. Poderá eventualmente ser efectuada a cultura, mas com recurso a uma espécie com fotoperíodo menor.

**Tabela 18 – Quantidade de óleo extraído no período de funcionamento considerado, para o cenário de Q=6%, com variação do teor de lípidos.**

Q=6%		Óleo [g/dia]			
		Teor de Lípidos			
Mês	18%	28%	40%	58%	
Mar	12,82	17,09	22,29	26,55	
Abr	18,97	25,30	33,00	39,30	
Mai	21,50	28,67	37,40	44,54	
Jun	23,23	30,97	40,40	48,12	
Jul	24,52	32,69	42,64	50,79	
Ago	22,02	29,36	38,30	45,61	
Set	15,52	20,69	26,99	32,14	
Média	19,80	26,40	34,43	41,01	

O valor médio de produção de óleo indicado é referente à produção de um fotobioreactor, dado que cada célula é constituída por quatro fotobioreactores, e sendo o período de operação relativo a 214 dias temos, uma produção anual de (Tabela 19):

**Tabela 19 – Produção de óleo anual (l/ha.ano)**

Q=6%		Óleo [l/ha.ano]			
		Teor de lípidos			
	N.º de células/ha	18%	28%	40%	58%
Conf. Vertical	106	2138,48	2851,30	3719,09	4429,70
Conf. Inclínada 45º	92	1856,04	2474,71	3227,89	3844,65

Fazendo uma comparação com a Tabela 2 (capítulo I), podemos constatar a elevada produtividade das microalgas face às restantes matérias-primas. No entanto apesar dos

valores obtidos não corresponderem aos indicados na tabela 2 o resultado é bastante satisfatório uma vez que os cálculos foram efectuados tendo com base eficiências muito próximas da realidade para uma localização geográfica específica. É de salientar que a produtividade do fotobioreactor assumida foi igual para ambas configurações, o que implica que a energia captada é igual. O que na realidade não se verifica, pois a configuração inclinada tem um melhor aproveitamento da radiação incidente tendo na realidade uma produtividade maior, logo os resultados obtidos na configuração inclinada são inferiores ao real. É necessário efectuar um estudo relativamente à energia capturada para as diferentes configurações, de modo a determinar a melhor configuração, comparativamente com a área instalada.

Relativamente aos valores indicados na tabela 2, o que à partida não parece comprável com os resultados obtidos não corresponde inteiramente aos factos. Analisando os pressupostos considerados pelo autor verificamos que os dados apresentados têm como base os seguintes pressupostos:

- i) A produção de peso seco é referente à rentabilidade de reactores à escala laboratorial com diâmetro do tubo sempre inferior a 12 cm. Para a microalga considerada no presente estudo, estes fotobioreactores apresentam uma rentabilidade de cerca de  $13\text{-}25\text{ g/m}^2\cdot\text{dia}$ ;
- ii) Período de funcionamento de um ano (365 dias)
- iii) A área de produção considerada não contempla a área da unidade de apoio, nem corredores de manutenção.

Efectuando o calculo da produção por unidade de área instalada, para o reactor projectado, considerando o cenário de  $Q=6\%$  e um teor de lípidos de  $18\%$  obtemos o valor de  $140000\text{L/ha.ano}$ . Valor este, próximo dos indicados na tabela 2, sendo o resultado obtido superior ao indicado, precisamente pelo facto de o diâmetro do fotobiorreactor projectado ser superior ao fotobiorreactor considerado nos resultados expresso da tabela 2.

## **Capítulo IV**

*Neste capítulo são feitas as conclusões gerais do trabalho desenvolvido, bem como um conjunto de um conjunto de propostas para desenvolvimento de trabalhos futuros.*

### **4. Conclusões gerais**

Neste trabalho foi realizado o projecto mecânico de um fotobiorreactor, que permite biomassa de microalgas para posterior extracção de óleo para transformação em biodiesel. A flexibilidade da solução proposta de fotobiorreactor, permite otimizar as condições/parâmetros de cultura para diferentes espécies de microalgas. O protótipo projectado apresenta uma capacidade de cultura de 710 litros, uma construção modular, sistema de agitação mecânico, sistema de controlo de temperatura, funcionamento com iluminação natural e/ou artificial, funcionamento na vertical ou inclinado até 45°, sistema de troca de gases e sistema de controlo de contaminação.

O processo de produção de biomassa de microalgas no fotobiorreactor projectado, e posterior extracção do óleo, tendo em conta a localização geográfica para a qual o estudo energético foi realizado, é energeticamente viável apenas para o fotoperíodo natural e para o fotoperíodo de 12h nos meses de Março a Setembro, não sendo viável para o fotoperíodo de 16h.

Da análise de *scale-up* efectuada, comprova-se a potencialidade das microalgas como fonte de matéria-prima para produção de biodiesel, no que diz respeito à sua produtividade comparativamente com as restantes fontes de matéria-prima.

#### ***4.1.Trabalhos Futuros***

Como seguimento a este trabalho, propõem-se de seguida um conjunto de trabalhos, com vista ao melhoramento do projecto realizado.

- Construção do protótipo e realização de testes operacionais com medições dos parâmetros físicos e químicos.
- Optimização das condições de cultura em fotobiorreactores.
- Estudo de viabilidade económica do processo de produção, e soluções aplicáveis ao nível industrial para redução do custo do processo.







***Bibliografia e Referências***

- [1] – Danielo, O. (2005) *An algae-based fuel*. Biofutur, N°255. Maio
- [1] – Wikipédia (2008) *Biocombustível*. <http://pt.wikipedia.org/wiki/Biocombustível>, consultado em 2008/02/15
- [2] – Bourne Jr, J.K., (2007) *Sonhos Verdes*. National Geographic Portugal, Vol.7, N°80, pp.8-31
- [3] – 1º veículo Ford,  
[http://patentpending.blogs.com/patent\\_pending\\_blog/images/ford\\_quadricycle.jpg](http://patentpending.blogs.com/patent_pending_blog/images/ford_quadricycle.jpg)
- [4] – 1º motor diesel,  
[http://www.speedace.info/speedace\\_images/diesel\\_motor\\_man\\_1906.jpg](http://www.speedace.info/speedace_images/diesel_motor_man_1906.jpg)
- [5] – Gomes, R (2006) *Manual do BioDiesel*. Litexa Editora
- [6] – Knothe, G., Van Gerpen, J. & Krah, J. (2005) *The Biodiesel Handbook*, AOCS Press.
- [7] – Biodieselbr (2008) *Biodiesel no Mundo*.  
<http://www.biodieselbr.com/biodiesel/mundo/biodiesel-no-mundo.htm>, consultado em 2008/03/20
- [8] – Portal das Energias Renováveis (2008) *O parlamento Europeu opta pelo compromisso na promoção dos biocombustíveis*.  
<http://www.energiasrenovaveis.com/html/CANAIS/noticias/noticias0203.asp>, consultado em 2008/03/21
- [9] – Pulz, O. & Gross, W. (2004) *Appl Microbiol Biotechnol Valuable products from biotechnology of microalgae*. Vol 65. pp. 635-648
- [10] – McKibben, B. (2007) *As Novas Contas do Carbono*. National Geographic Portugal, Vol.7, N°80, pp.2-7.
- [11] – Rádio das Nações Unidas (2007) *PMA destaca iniciativas contra a fome em 2007*.  
<http://www.un.org/radio/por/detail/4852.html>, consultado em 2008/02/09
- [12] – Carlsson, A.S; van Beilen, J.B.; Moller, R. & Clayton, D. (2007). *Micro and Macro-Algae: Utility for industrial applications*. CPL Press.
- [13] – Chisti, Y. (2007) *Biodiesel from microalgae*, *Biotechnology Advances* 25, pp.294-306.
- [14] – Putt R. (2007), *Algae as a Biodiesel Feedstock: A feasibility Assessment*, Department of Chemical Engineering Auburn University, Alabama. EUA.
- [15] – Olaizola, M. (2003) *Commercial development of microalgal biotechnology: from the test tube to the marketplace*. *Biomolecular Engineering* Vol.20, pp.459-466.
- [16] – Salisbury, F.B. & Ross, C.W. (1985), *Plant Physiology*, 3ªEd. Wadsworth publishing Company, Inc. pp.180.

- [17] – Sheehan, J., Dunahay, T., Benemann, J., & Roessler, P. (1998) A look back at the U.S. Department of Energy's aquatic species program - biodiesel from algae. NREL/TP-580-24190. U.S. Department of Energy's Office of Fuels Development.
- [18] – Huntley, M.E. & Redalje, D.G. *CO<sub>2</sub> mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal* (2007) Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change Vol.12: pp.573-608.
- [19] – Lavens, P; Sorgeloos, P. (eds.) (1996) *Manual on the production and use of live food for aquaculture*. FAO Fisheries Technical Paper. N°361. Rome, FAO.
- [20] – Illman, A.M., Scragg, A.H. & Shales, S.W. (2000) *Increase in Chlorella strains calorific values when grown in low nitrogen medium*. Enzyme and Microbial Technology. Vol.27 pp.631-635.
- [21] – Fidalgo, J.P., Cid, A., Torres, E., Sukenik, A. & Herrero, C.(1998), *Effects of nitrogen source and growth phase on proximate biochemical composition, lipid classes and fatty acid profile of the marine microalga Isochrysis galbana*, Aquaculture Vol. 166 pp.105-116.
- [22] – Dimitrov, K (2007) *GreenFuel Technologies: A Case Study for Industrial Photosynthetic Energy Capture*. Março , Brisbane, Australia.
- [23] – Grima, E.M., Camacho, F.G., Perez, J.A.S., Fernandez, F.G.A. & Sevilla J.M.F. (1997) *Evaluation of photosynthetic efficiency in microalgal cultures using averaged irradiance* Enzyme and Microbial Technology, Vol.21 pp. 375-381.
- [24] – Fernandez, F.G., Camacho, F.G., Perez, J.A., Sevilla, J.M. & Grima, E.M. (1998) *Modeling of biomass productivity in tubular photobioreactors for microalgal cultures: Effects of dilution rate, tube diameter, and solar irradiance*. Biotechnol Bioeng. Vol.58 pp.605-616.
- [25] – Pirt, S.J. (1986) *The thermodynamic efficiency (quantum demand) and dynamics of photosynthetic growth*. New Phytologist, Vol. 102, pp. 3-37
- [26] – Mathews, C.K., van Holde, K.E. & Ahern, K.G. (2000) *Photosynthesis – Biochemistry*, Prentice Hall; 3 ed. pp.619.
- [27] – Tamiya, H. (1957) *Mass culture of algae*. Annual Review of Plant Physiology. Vol. 8 pp.309-334.
- [28] – Kok, B. (1952) *On the efficiency of Chlorella growth*. Acta Bot. Neerlandica Vol.1: p. 445.
- [29] – Soeder, C. J. (1986) *A historical outline of applied algology. Handbook of microalgae mass production*. Richmond, A., Ed.; CRC Press. pp. 25-41
- [30] – Biofuels International (2008) *Bio-glossary*. [http://www.biofuelsinternationalexpo.com/bio\\_glossary.html](http://www.biofuelsinternationalexpo.com/bio_glossary.html), consultado em 2008/02/24.
- [31] – Wiktionary (2008) *Biomass* <http://en.wiktionary.org/wiki/biomass>, consultado em 2008/02/24.
- [32] – Borowitzka, M.A..(1999) *Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters*. Journal of Biotechnology Vol.70 pp.313–321.

- [33] – BioenergyWiki (2008) *Glossary: Photobioreactor*,  
[http://www.bioenergywiki.net/index.php/Glossary\\_N-Z#P](http://www.bioenergywiki.net/index.php/Glossary_N-Z#P), consultado em 2008/05
- [34] – CO<sub>2</sub> capture and storage (2008) *International Network on Biofixation of CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Abatement with Microalgae*.  
<http://www.co2captureandstorage.info/networks/Biofixation.htm>, consultado em 2008/06/08.
- [35] – Energy & Enviro Finland (2007) *Photo-bioreactor to produce biodiesel from algae*.  
[http://www.energy-enviro.fi/index.php?PAGE=691&NODE\\_ID=691&LANG=1](http://www.energy-enviro.fi/index.php?PAGE=691&NODE_ID=691&LANG=1),  
consultado em 2008/06/08.
- [36] – Carvalho, A.P, Meireles, L.A, & Malcata F.X (2006), *Microalgal Reactors: A Review of Enclosed System Designs and Performances*, Biotechnol. Prog. 2006, 22, p. 1490-1506
- [37] – Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E. & Isambert, A. (2006) *Commercial Applications of Microalgae*, Journal of Bioscience and Bioengineering, Vol. 101, N°. 2, pp. 87–96
- [38] – Walker, T.L., Purton, S., Becker, D.K. & Collet, C. (2005) *Microalgae as bioreactors*. Plant Cell Reports, Vol.24, pp. 629–641
- [39] – Hall, D.O., Acien Fernandez F.G., Guerrero, E.C., Rao, K.K. & Grima E.M. (2003) *Outdoor helical tubular photobioreactors for microalgal production: Modeling of fluid-dynamics and mass transfer and assessment of biomass productivity*. Biotechnology and Bioengineering. Vol. 82. pp. 62-73.
- [40] –Mandalam, R.K. & Palsson, B.O. (1998), *Elemental balancing of biomass and médium composition enhances growth capacity in high-density Chlorella vulgaris Cultures*; Biotechnology and Bioengineering. Vol.59 pp.605-611.
- [41] –Li, J., Xu, N.S. & Su, W.W. (2003) *Online estimation of stirred-tank microalgal photobioreactor cultures based on dissolved oxygen measurement* Biochemical Engineering Journal. Vol.14, pp. 51-65.
- [42] – Su, W.W., Li, J. & Xu, N.S. (2003) *State and parameter estimation of microalgal photobioreactor cultures based on local irradiance measurement*. Journal of Biotechnology Vol.105 pp.165-178.
- [43] – Algae Investment (2008) *Biological utilization of CO<sub>2</sub> via bioreactors*,  
[http://algaeinvestment.com/biological\\_utilization\\_of\\_co2\\_via\\_bioreactors.htm](http://algaeinvestment.com/biological_utilization_of_co2_via_bioreactors.htm),  
consultado em 2008/02/28
- [44] – Berg-Nilsen, J. (2006) *Production of Micro algae based products*, Nordic Innovation Centre & Algetech Produkter A.S.
- [45] – Former, C.R. (2007) *La producción de energia a partir de algas empieza en dos plantas en San Vicente*, Información, 14 de Março, pp. 2-3.
- [46] – Universidade de Alicante (2007) *El futuro de la energia está en el mar*,  
<http://www.ua.es/dossierprensa/2007/09/26/10.html>, consultado em 2008/03/24.
- [47] – Bioprodukte Prof. Steinberg (2008)  
<http://www.algomed.de/> consultado em 2008/04/20

- [48] – Barbosa, M.J.G.V. (2003) Microalgal photobioreactors: scale-up and optimisation. Tese de doutoramento, Universidade de Wageningen, Holanda.
- [49] – Lee, Y. K., Ding, S. Y., Low, C. S. & Chang, Y. C. (1995) Design and performance of an  $\alpha$ -type tubular photobioreactor for mass cultivation of microalgae. J. Appl. Phycol. Vol. 7, pp.47-51
- [50] –Martínez-Jerónimo, F & Espinosa-Chávez, F. (1994) *A laboratory-scale system for mass culture of freshwater microalgae in polyethylene bags*. Journal of Applied Phycology Vol. 6 pp.423-425.
- [51] – Moretti, A., Pedini Fernandez-Criado, M., Cittolin, G. & Guidastri, R. (1999) *Manual on hatchery production of seabass and gilthead seabream*. Volume 1. Rome, FAO.
- [52] – Lee, YK (2001), *Microalgal mass culture systems and methods: Their limitation and potential*. Journal of Applied Phycology. Vol.13, pp307–315
- [53] – Morita, M., Watanabe, Y. & Saiki, H. (2002) *Photosynthetic productivity of conical helical tubular photobioreactor incorporating Chlorella sorokiniana under field conditions*. Biotechnology and Bioengineering, Vol.77 pp.155-162
- [54] – Doucha, J. & Lívanský, K. (2006) *Productivity, CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> exchange and hydraulics in outdoor open high density microalgal (Chlorella sp.) photobioreactors operated in a Middle and Southern European climate*. J Appl Phycol Vol.18 pp.811–826.
- [55] – Mirón, A.S., Gómez A.C., Camacho, F.G., Grima, E.M. & Chisti, Y.(1999), *Comparative evaluation of compact photobioreactors for large-scale monoculture of microalgae*, et al, Journal of Biotechnology 70, Elsevier Science B.V., p.249-270.
- [56] – Neves,P. (2008) Modelo de crescimento de algas em bioreactor, não publicado, Ficheiro MS Excel.
- [57] – Crescimento microbiano (2008), <http://www.unb.br/ib/cel/microbiologia/crescimento/crescimento.html>, consultado em 2008/03/07
- [58] – Scragg, A.H., Illman, A.M., Carden, A. & Shales, S.W. (2002) *Growth of microalgae with increased calorific values in a tubular bioreactor*, Biomass and Bioenergy Vol. 23, pp.67-73.
- [59] – Petkov, G. & Garcia, G. (2007) *Which are fatty acids of the green alga Chlorella?* Biochemical Systematics and Ecology Vol.35, pp.281-285.
- [60] – Casal, M., Nobre, A., Ribeiro, A., Pais, C., Schuller, D., Rodrigues, G. and Cardoso, H. (2004) *Microbiologia e Genética Molecular Microbiana* - Manual de Laboratório. Departamento de Biologia, Universidade do Minho (ed). Copissaurio.
- [61] – Tebecherani, C.T.P. (2001) Aços inoxidáveis [http://www.pipesystem.com.br/Artigos\\_Tecnicos/Aco\\_Inox/Artigo\\_para\\_pipesystem\\_sobre\\_inox1.pdf](http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aco_Inox/Artigo_para_pipesystem_sobre_inox1.pdf), consultado em 2008/04/12
- [62] – AZo Materials (2008) Stainless Steel - Grade 316 – Properties, Fabrication and Applications - <http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=863>, consultado em 2008/04/12

- [63] – Fonseca, M.M & Teixeira, J.A. (2006) Reactores Biológicos - Fundamentos e Aplicações, LIDEL edições técnicas.
- [64] – AALCO (2008); *Technical Informations about Stainless Steel*;  
<http://www.aalco.co.uk/technical/stainless.html>, consultado em 2008/04/12
- [65] – Key to Steel; [www.key-to-steel.com](http://www.key-to-steel.com)., consultado em 2008/04/12
- [66] – British Stainless Steel Association; Technical Information (2008)*Melting Temperature Range for Stainless Steel*;  
<http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=103>, consultado em 2008/04/12.
- [67] – British Stainless Steel Association; Technical Information (2008)*Melting Temperature Range for Stainless Steel*; <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=42>, consultado em 2008/04/12
- [68] – ASKzn (2007) *Grades of Stainless Steel - Grade 316*;  
[http://www.askzn.co.za/tech/tech\\_grade\\_316.htm](http://www.askzn.co.za/tech/tech_grade_316.htm), consultado em 2008/04/14
- [69] – VICK (2008) *PTFE Boletim técnico*,  
[http://www.vick.com.br/vick/Produtos/PTFE/tabela\\_quimica.htm](http://www.vick.com.br/vick/Produtos/PTFE/tabela_quimica.htm), consultado em 2008/04/12
- [70] – Wikipédia (2008) Acrílico;  
[http://pt.wikipedia.org/wiki/Acr%C3%ADlico\\_\(pl%C3%A1stico\)](http://pt.wikipedia.org/wiki/Acr%C3%ADlico_(pl%C3%A1stico)), consultado em 2008/04/17
- [71] – Plásticos do Sado (2003) Manual técnico - Acrílico CN E EX; [http://www.plasticos-do-sado.pt/fic\\_down/manual\\_acrilico.zip](http://www.plasticos-do-sado.pt/fic_down/manual_acrilico.zip)
- [72] – Wikipédia (2008) PVC; <http://pt.wikipedia.org/wiki/PVC>, consultado em 2008/04/17
- [73] – Unplasticised Polyvinyl Chloride (2007)- Unplasticised PVC – UPVC;  
<http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=770>
- [74] – Cepex (2007) – Resistência química de plásticos e elastômeros;  
<http://www.cepex.com/worldwide/portugal/chemical.html>
- [75] – Chlorinated Polyvinyl Chloride (2008)– CPVC Chlorinated PVC;  
<http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=775>
- [76] – Cepex – Catálogo técnico (2008);  
<http://www.cepex.com/worldwide/portugal/catalogues.html>
- [77] – Marco Rubber & Plastic Products, Inc. (2008), 334 Clark Street, North Andover, MA 01845, USA. [www.marcorubber.com/materialguide.html](http://www.marcorubber.com/materialguide.html)
- [78] – Rubber Associates (2008), Inc;  
<http://www.rubberassociates.com/pages/materialprep.html>,
- [79] – Tabela de resistência química do PTFE (2008);  
[http://www.texloc.com/closet/cl\\_chemical\\_resist\\_chart2.html](http://www.texloc.com/closet/cl_chemical_resist_chart2.html)
- [80] – Tabela de resistência química do Nitrilo (2008);  
[http://www.allstategasket.com/chem\\_res\\_cht.asp](http://www.allstategasket.com/chem_res_cht.asp)

- [81] – Tabela de resistência química do Nitrilo e do Viton (2008);  
<http://www.plumbingstore.com/chemicals.html>
- [82] – Teixeira-Dias, Filipe; *Apontamentos da disciplina de Mecânica computacional (2007/2008)*, Departamento de engenharia mecânica, Universidade de Aveiro.
- [83] – Sun Shadow Apple (2008); <http://www.jgiesen.de/sunshadow/index.htm>
- [84] – Coordenadas Geográficas (2008);  
<http://codigopostal.ciberforma.pt/ferramentas/coordenadas.asp>
- [85] – Ângulos de posicionamento solar (2008) ;  
<http://www.srrb.noaa.gov/highlights/sunrise/azelzen.gif>
- [86] – Martinho, E., et al,(1985), *Matemática Para o eEstudo da Física*, Fundação Calouste Gulbenkian, p.35
- [87] – Cepex, catálogo de válvulas de esfera, (2008);  
<http://www.cepex.pt/>
- [88] – Araldite® 2021 propriedades, (2008); <http://www.huntsman.com/>
- [89] – Araldite® 2021 propriedades, (2008);  
[http://www.huntsman.com/advanced\\_materials/index.cfm?PageID=6763](http://www.huntsman.com/advanced_materials/index.cfm?PageID=6763)
- [90] – Melo, F, Morais A., *Apontamentos de Órgãos de Máquinas (2006/2007)*, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.
- [91] – Shigley, J., e tal (2004), *Mechanical Engineering Design*, Seventh Edition, McGraw-Hill
- [92] – SKF (2008), Catálogo de rolamentos, <http://www.skf.com/>
- [93] – Atlas Copco, motores pneumático (2008);  
[http://www1.atlascopco.com/websites/tools/products/main.nsf/va\\_proxy/Air+MotorsPT?opendocument&Tools](http://www1.atlascopco.com/websites/tools/products/main.nsf/va_proxy/Air+MotorsPT?opendocument&Tools), consultado em 2008/06/06
- [94] – Naismith, polias e correias (2008);  
<http://www.naismith.com.au/product/drive/polyv/index.htm>, consultado em 2008/06/07
- [95] –Yiork-ind, tensionadores de correia (2008);  
[http://www.york-ind.com/tensioners/tensioner\\_PS4.htm](http://www.york-ind.com/tensioners/tensioner_PS4.htm), consultado em 2008/06/07
- [96] – Pratoomyot, J., Srivilas, P., Noiraksar, T.(2005), *Fatty acids composition of 10 microalgal species*, Songklanakarin J. Sci. Technol., p.1179-1187
- [97] – Scragg, A.H., Morrison, J., Shales (2003), S.W., *The use of a fuel containing Chlorella vulgaris in a Diesel engine*, Enzyme and Microbial Tecnology, Elsevier Inc., p.884-889
- [98] – Kozłowska-Szerenos, B., et al, (2004), *Enhancement of photosynthetic O<sub>2</sub> evolution in Chlorella vulgaris under hight light and increased CO<sub>2</sub> concentration as a sign of acclimation to phosphate deficiency*, Plant Physiology and Biochemistry, Elsevier Inc., p.403-409

- [99] – Department of Meteorology of University of Maryland (2008) *Photosynthetically Active Radiation (PAR) as observed from satellites*.  
[http://www.atmos.umd.edu/~srb/par/92par\\_flux\\_reg.htm](http://www.atmos.umd.edu/~srb/par/92par_flux_reg.htm), consultado em 2008/06/02.
- [100] – Ogbonna, J., Tanaka, H., (1997), *Industrial-size photobioreactors*, Chemtech, , p.43-49



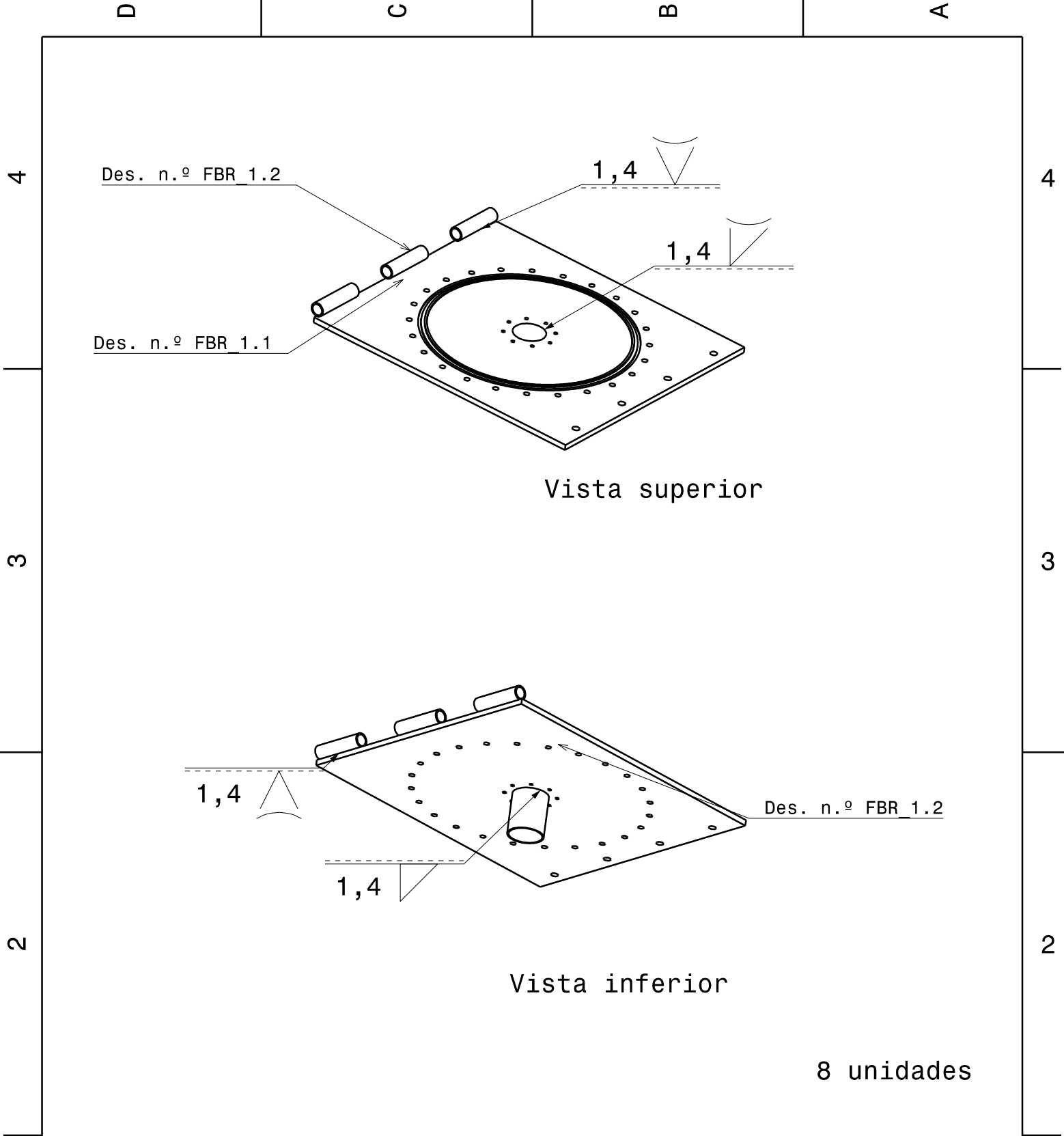


## ***5. Anexos***

## Anexo I

## Lista de Material: Fotobioreactor

Número	Quantidade	Descrição	Material	Des. N.º
1	8	Tubo acrilido D300x4	Acrílico	FBR_7
2	8	Tubo acrilido D90x3	Acrílico	FBR_7
3	8	Falange inferior do tubo D300x4	Inox 316L	FBR_2
4	8	Falange superior do tubo D300x4	Inox 316L	FBR_3
5	16	Falange do tubo acrilico D90x3	Inox 316L	FBR_10
6	8	Junta superior	Inox 316L	FBR_4
7	8	Apoio do mecanismo de agitação	Inox 316L	FBR_6
8	8	Veio de Agitação	Inox 316L	FBR_13
9	16	Falange da camara superior	Inox 316L	FBR_5
10	8	Tubo acrilico da camara superior	Acrílico	FBR_9
11	8	Base da coluna	Inox 316L	FBR_1
12	8	Dobradiça coluna	Aço Ck 45	FBR_11
13	8	Tampa da coluna	Acrílico	FBR_12
14	24	Válvulas de esfera em PVC D50	PVC	*
15	24	Casquilho	Nylon	FBR_14
16	8	Veio do sistema de inclinação	Aço Ck 45	FBR_15
17	8	Freio interior 170	Aço	*
18	8	Freio exterior 140	Aço	*
19	8	Rolamento	Aço inox	*
20	8	Correia		*
21	8	Tensionador de correia	Aço inox	*
22	8	Motor pneumático	Aço inox	*
23	8	Polia	Aço inox	*
24	24	Válvula	Aço inox	*
25	8	torneiras	Aço inox	*
24	8	electroválvula	Vários	*
27	8	manómetro de pressão	Vários	*
28	40	o'ring 298x3,5	Nitrilo	*
29	4	o'ring 82x2	Nitrilo	*
30	4	o'ring 60x2	Nitrilo	*
31	768	parafuso CHC M8x30 classe 5.6	Aço	*
32	768	poca M8	Aço	*
33	192	anilha M8	Aço	*
34	128	parafuso CHC M5x20 classe 5.6	Aço	*
35	40	conectores pneumáticos rápidos	Aço inox	*



This drawing is our property.  
It can't be reproduced  
or communicated without  
our written agreement.

Universidade de Aveiro  
Departamento de Engenharia Mecânica

DRAWING TITLE

Assembly soldadura base

DRAWN BY  
Hugo Macedo

DATE  
xxx

CHECKED BY  
XXX

DATE  
xxx

SIZE  
A4

DRAWING NUMBER

FBR 1

REV  
X

DESIGNED BY  
XXX

DATE  
xxx

SCALE

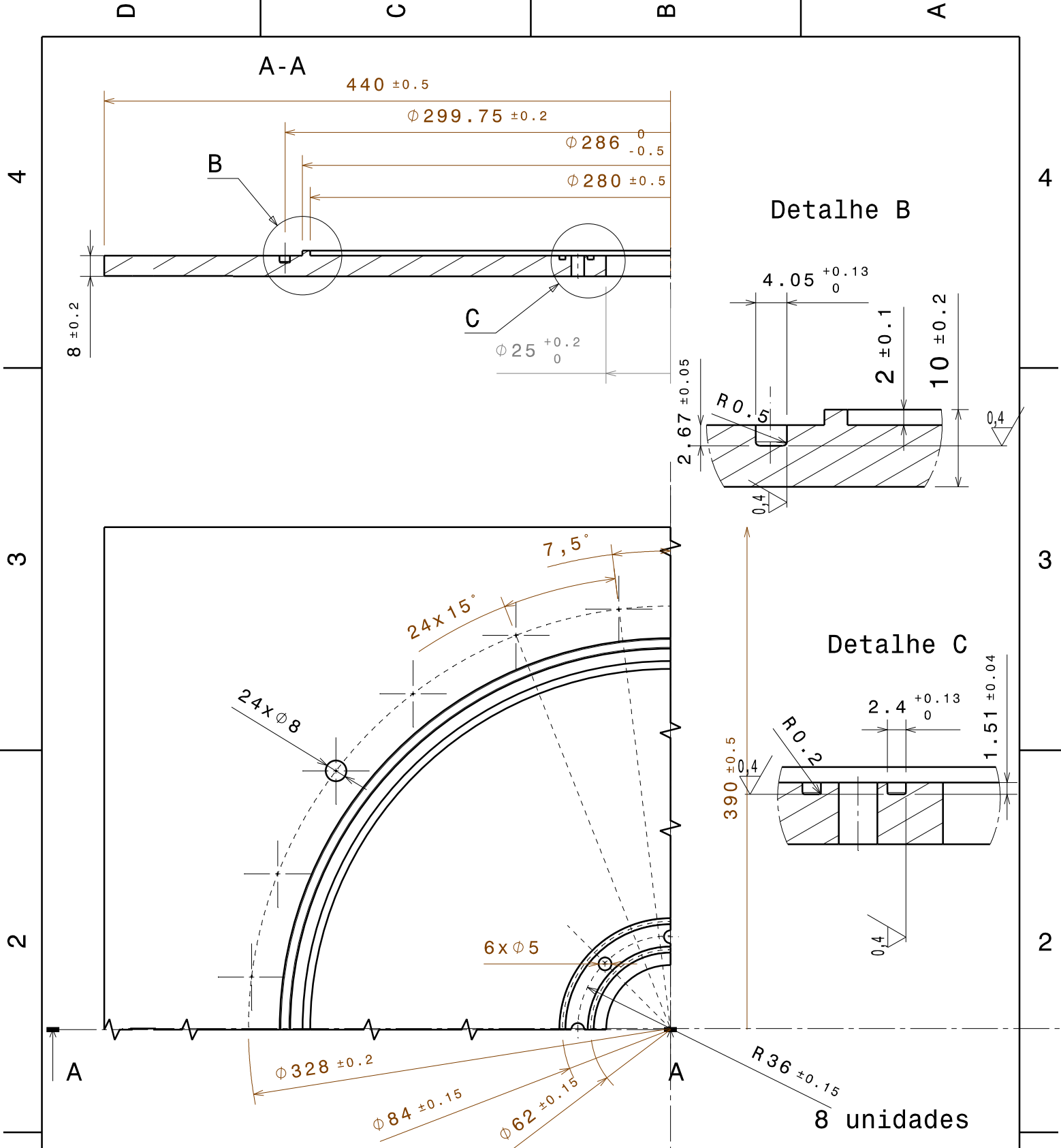
1:7

WEIGHT (kg)

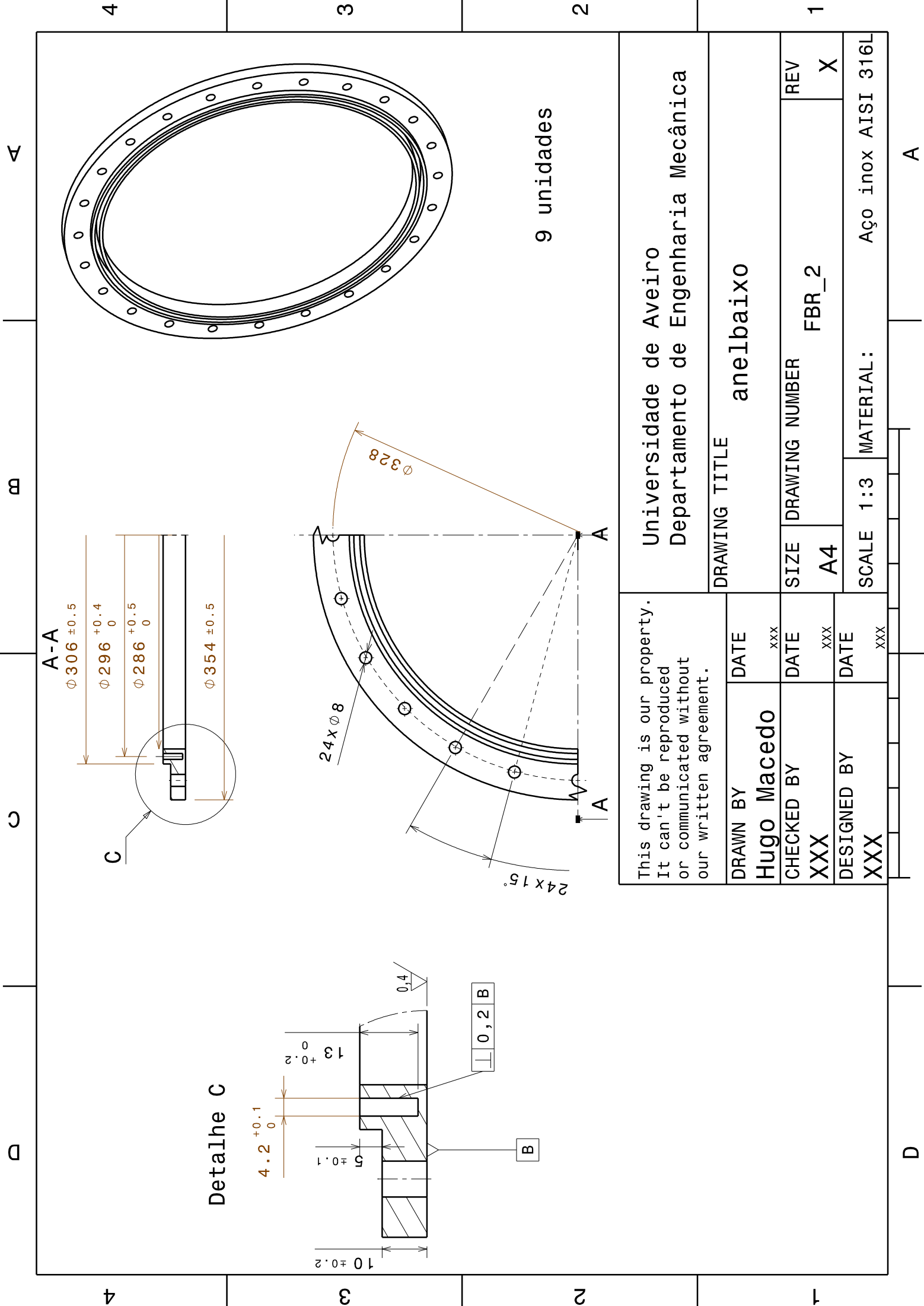
XXX

SHEET

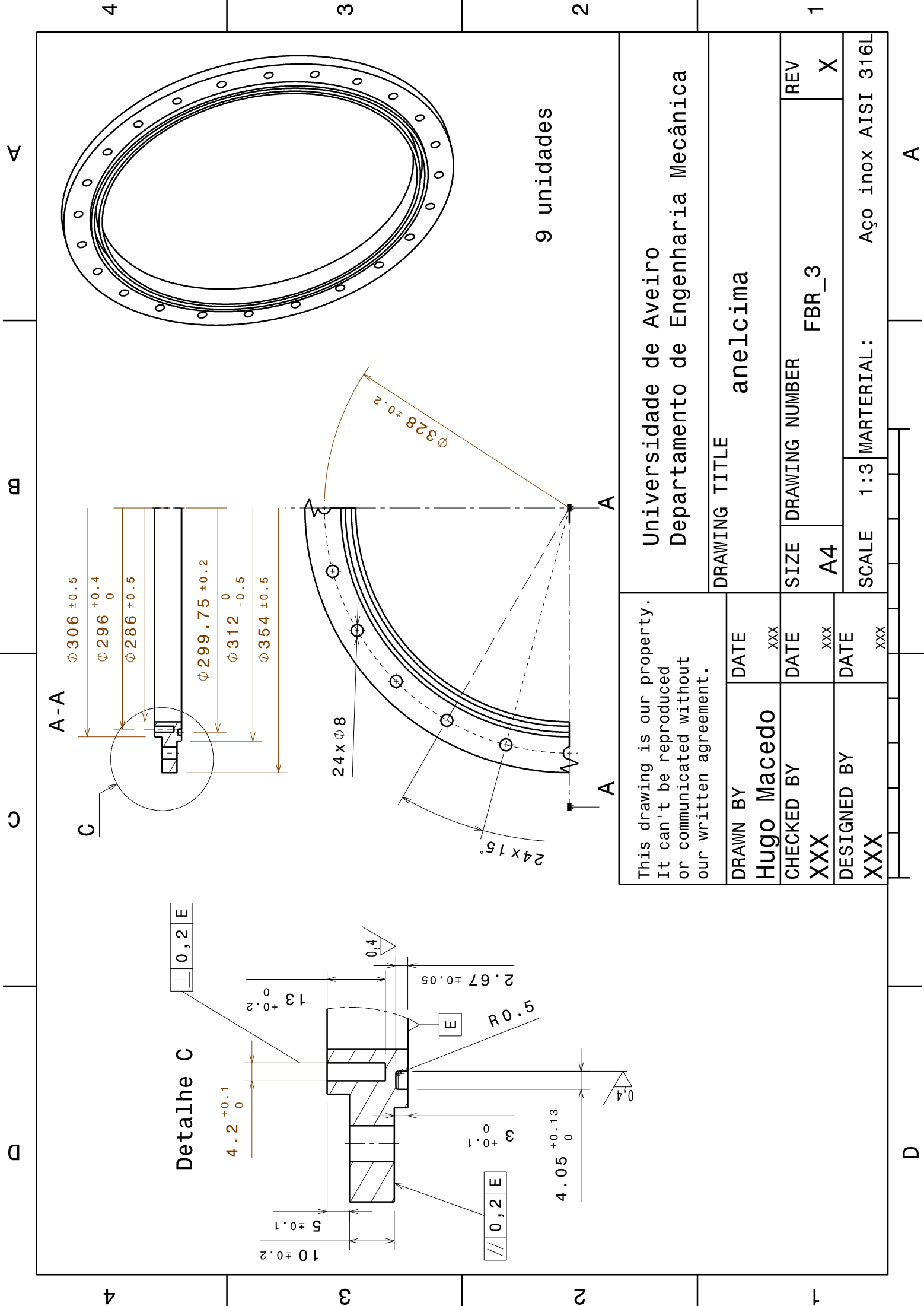
1 / 1



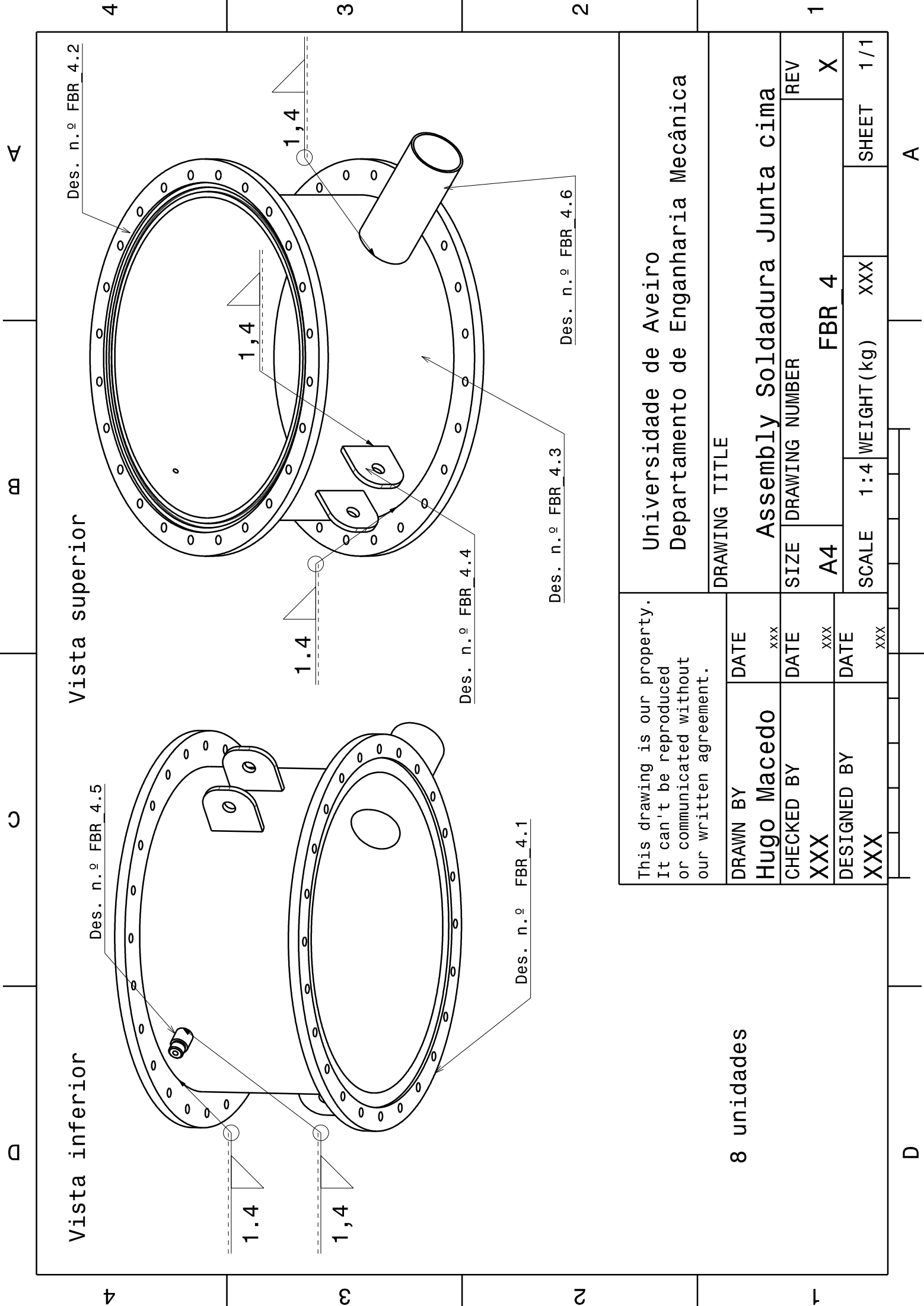
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		Universidade de Aveiro		Departamento de Engenharia Mecânica	
		DRAWING TITLE		Base	
DRAWN BY	DATE	SIZE		REV	
Hugo Macedo	xxx	A4		X	
CHECKED BY	DATE	DRAWING NUMBER		REV	
XXX	xxx	FBR_1.1		X	
DESIGNED BY	DATE	SCALE		MATERIAL:	
XXX	xxx	1:2		Aço inox AISI 316L	



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica		anelbaixo	
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.	DRAWN BY	DATE	SIZE
	Hugo Macedo	xxx	A4
	CHECKED BY	DATE	DRAWING NUMBER
XXX		xxx	FBR_2
DESIGNED BY		DATE	REV
XXX		xxx	X
SCALE 1:3		MATERIAL: Aço inox AISI 316L	



This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica	
DRAWN BY Hugo Macedo	DATE xxx	DRAWING TITLE anelcima	
CHECKED BY XXX	DATE xxx	SIZE A4	REV X
DESIGNED BY XXX	DATE xxx	DRAWING NUMBER FBR_3	
SCALE 1:3		MATERIAL: Aço inox AISI 316L	







A

B

C

D

4

4

3

3

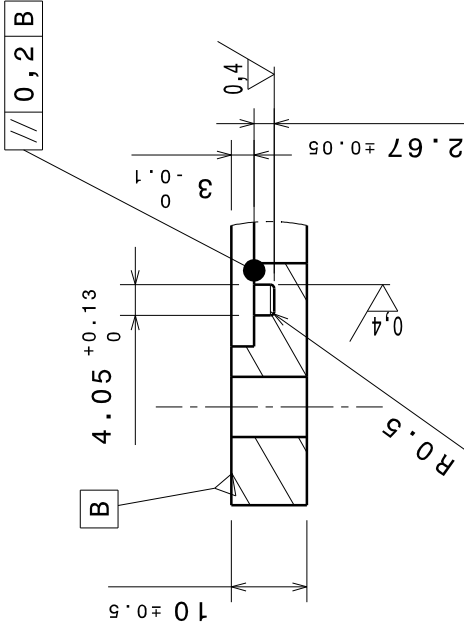
2

2

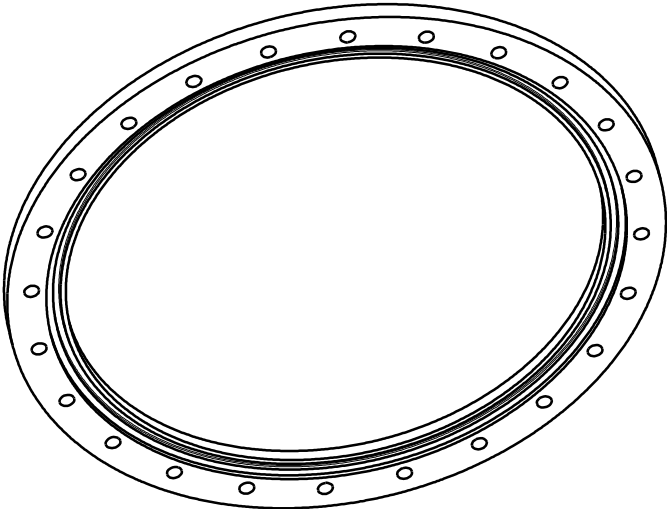
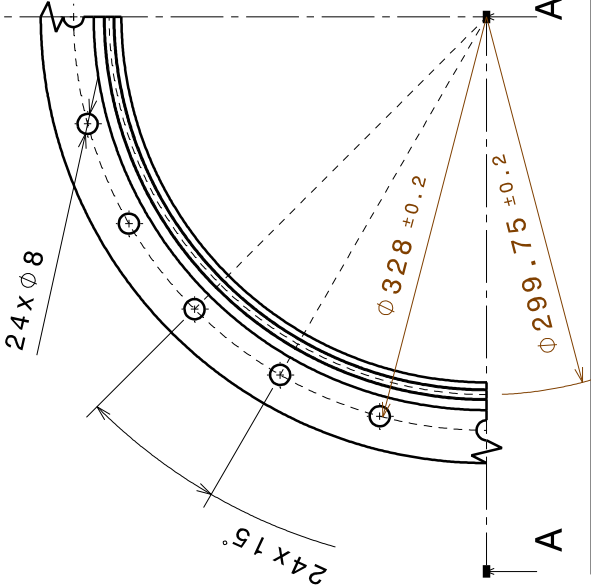
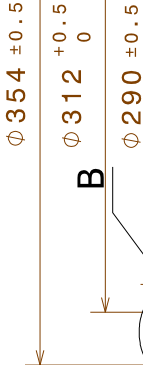
1

1

Detalhe B



A-A



8 unidades

This drawing is our property.  
It can't be reproduced  
or communicated without  
our written agreement.

Universidade de Aveiro  
Departamento de Engenharia Mecânica

DRAWING TITLE

anel\_juntacima

DATE

Hugo Macedo

xxx

CHECKED BY

XXX

DATE

DATE

xxx

DESIGNED BY

XXX

DATE

DATE

xxx

SCALE

1:3

MATERIAL:

Aço inox AISI 316L

SIZE

A4

DRAWING NUMBER

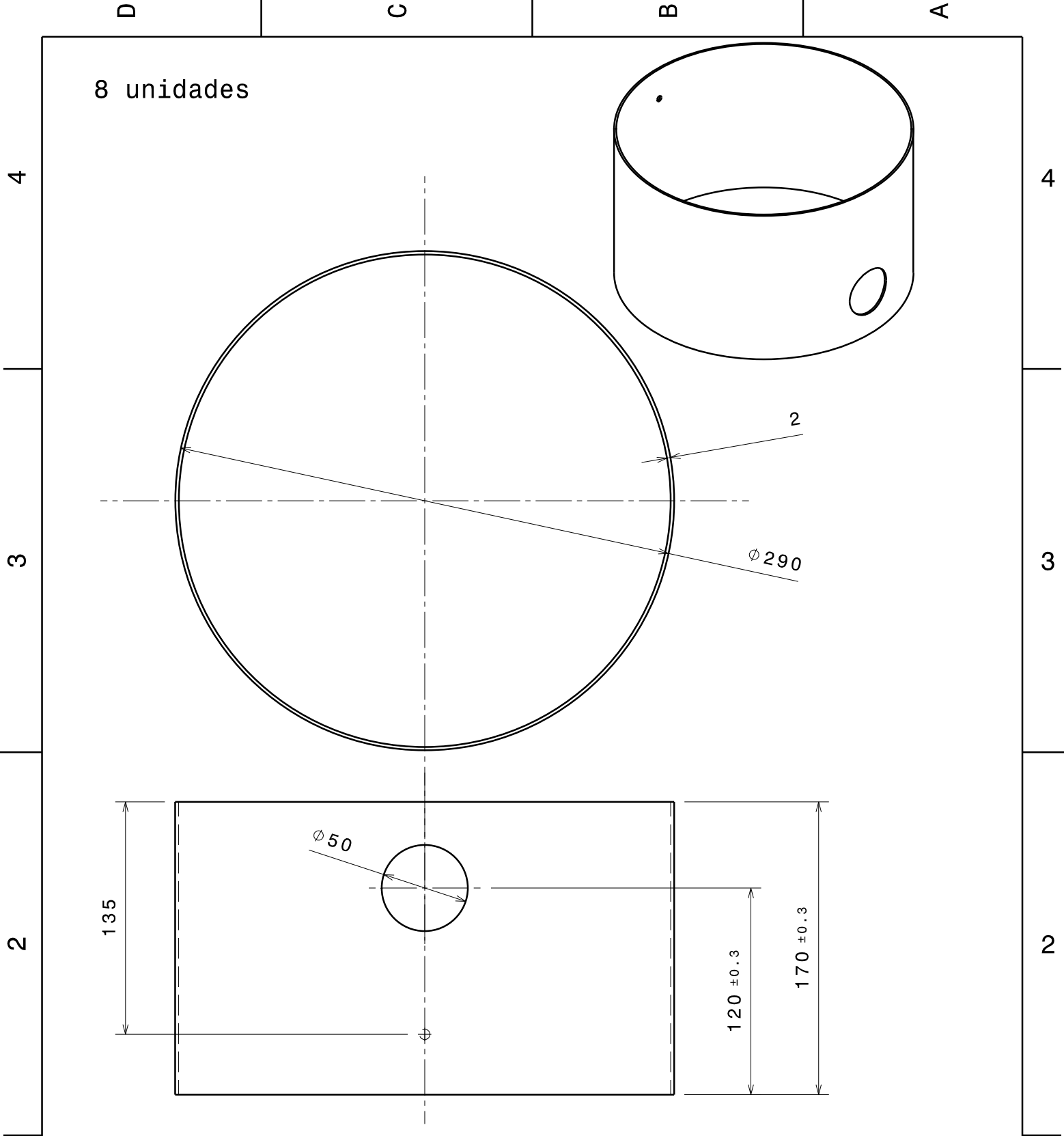
FBR 4.2

REV

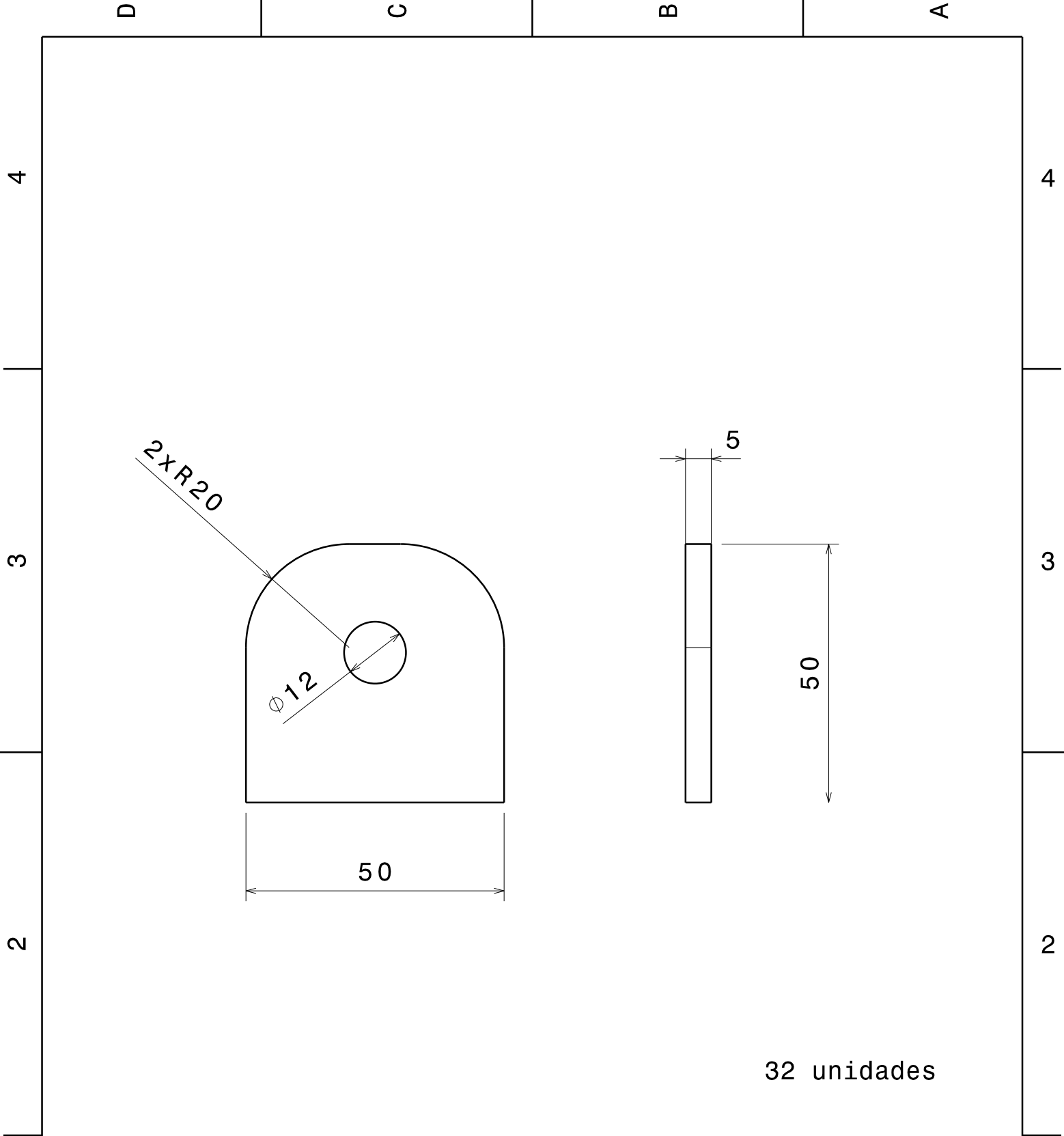
X

D

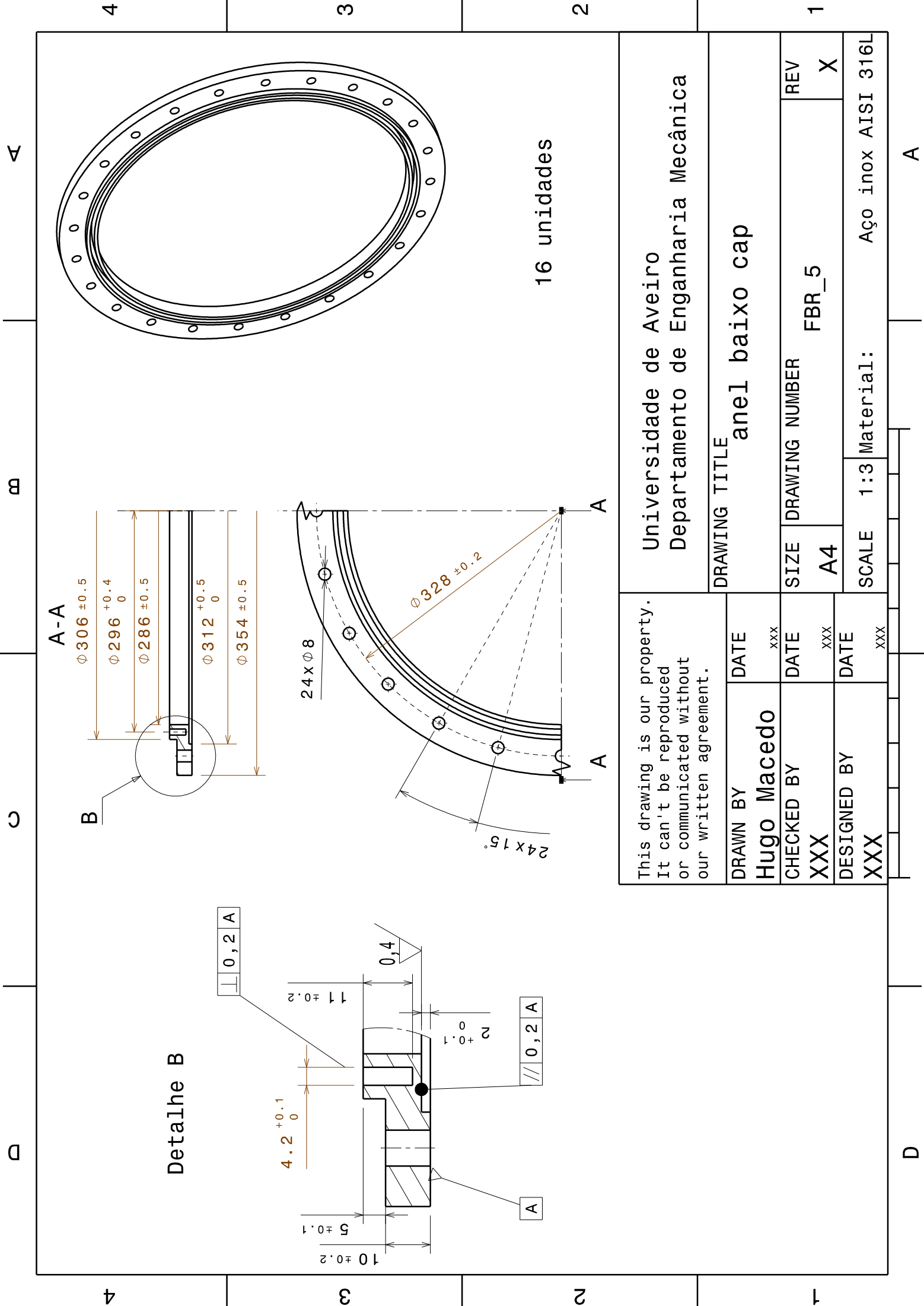
A



This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica			
		DRAWING TITLE      tronco juntacima			
DRAWN BY Hugo Macedo	DATE xxx				
CHECKED BY XXX	DATE xxx	SIZE A4	DRAWING NUMBER FRB 4.3		REV X
DESIGNED BY XXX	DATE xxx	SCALE    1:3	MATERIAL:      Aço inox AISI 316L		



This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica			
		DRAWING TITLE Orelha			
DRAWN BY Hugo Macedo	DATE xxx	SIZE A4			
CHECKED BY XXX	DATE xxx				
DESIGNED BY XXX	DATE xxx	DRAWING NUMBER FBR 4.4		REV X	
		SCALE 1:1		MATERIAL: Aço Inox AISI 316L	



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica		anel baixo cap	
DRAWING TITLE		REV	
DRAWN BY Hugo Macedo		DRAWING NUMBER FBR_5	
CHECKED BY XXX		REV X	
DESIGNED BY XXX		SCALE 1:3	
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		Material: Aço inox AISI 316L	

4

4

3

3

2

2

1

1

D

C

B

A

Des. n.º FBR 6.3

Des. n.º FBR 6.2

1,4

2

Des. n.º FBR 6.4

Des. n.º FBR 6.1

8 unidades

This drawing is our property.  
It can't be reproduced  
or communicated without  
our written agreement.

Universidade de Aveiro  
Departamento de Engenharia Mecânica

DRAWING TITLE

DRAWN BY  
Hugo Macedo

DATE  
xxx

Assembly de soldadura apoio rol

CHECKED BY  
XXX

DATE  
xxx

SIZE  
A4

DRAWING NUMBER

FBR 6

REV  
X

DESIGNED BY  
XXX

DATE  
xxx

SCALE

1:4

WEIGHT (kg)

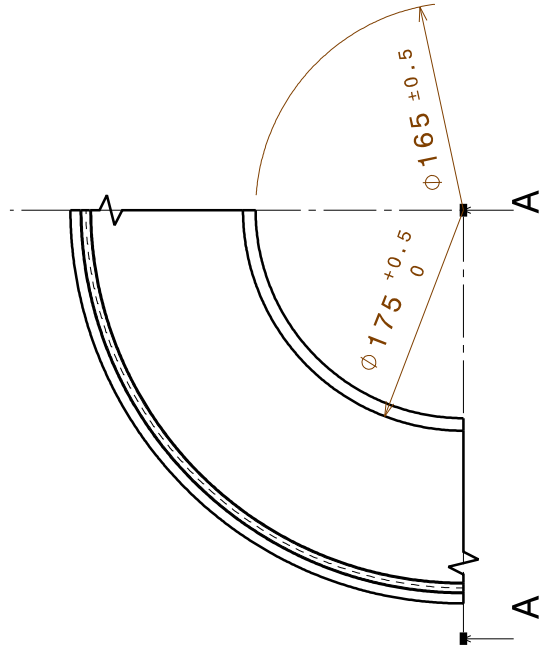
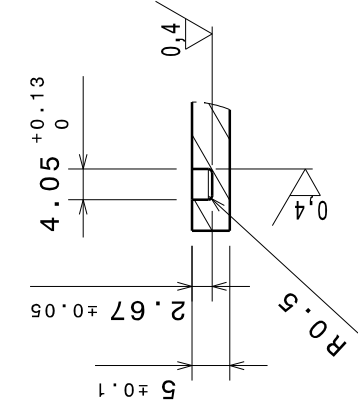
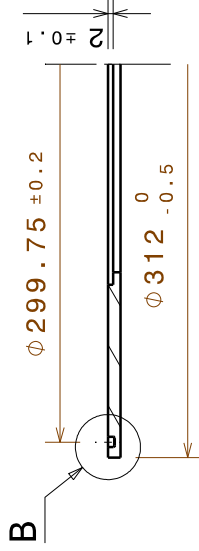
XXX

SHEET

1 / 1

D

A

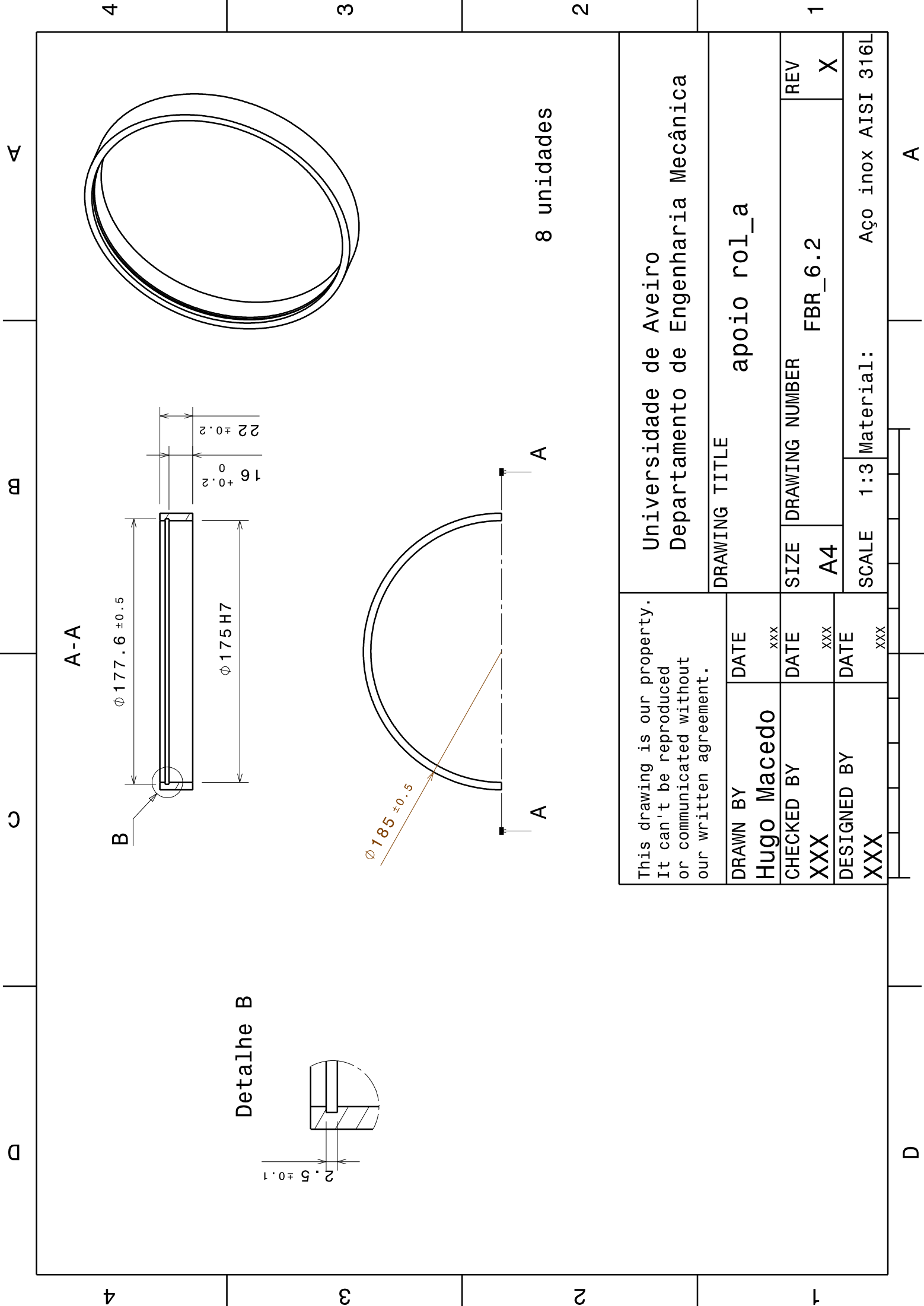


8 unidades

This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica			
DRAWING TITLE		apoio rol_b			
DRAWN BY	DATE	SIZE	DRAWING NUMBER	REV	
Hugo Macedo	xxx				
CHECKED BY	DATE	A4	FBR_6.1	X	
XXX	xxx				
DESIGNED BY	DATE	SCALE 1:3		MATERIAL: Aço inox AISI 316L	
XXX	xxx				

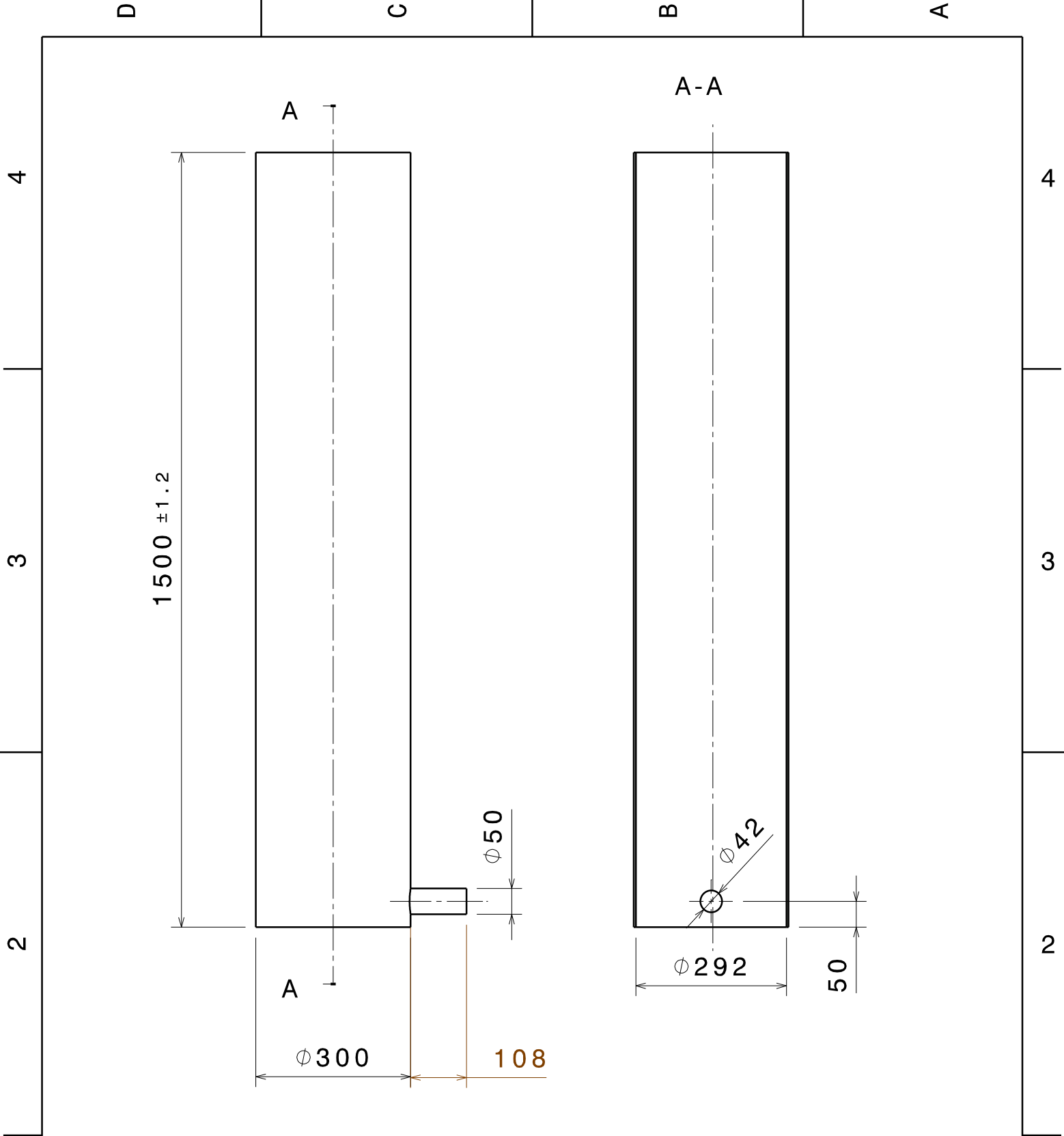


A

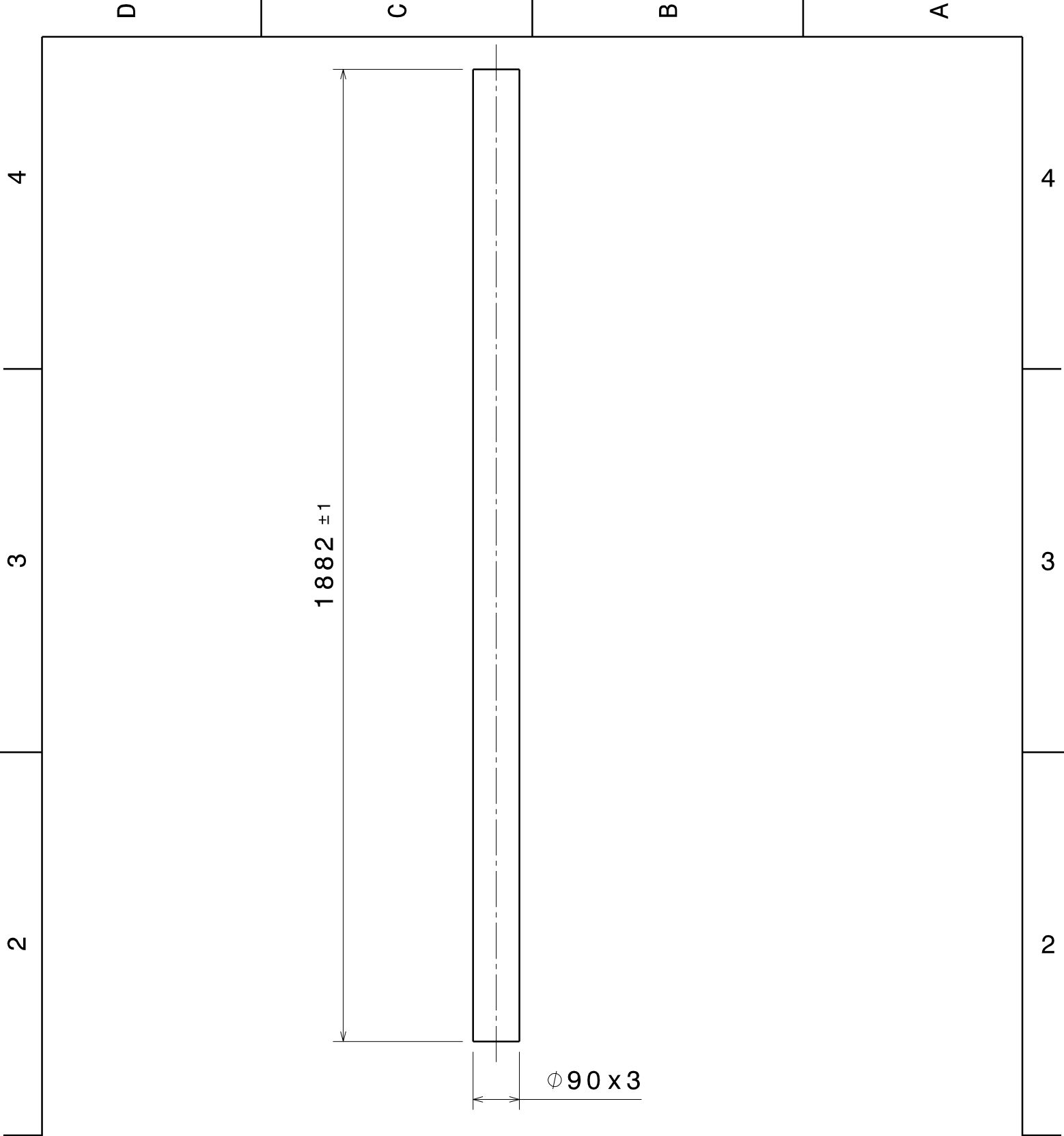


Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica		apoio rol_a	
		SIZE	DRAWING NUMBER
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		A4	FBR_6.2
		SCALE	1:3
DRAWN BY		DATE	REV
Hugo Macedo		xxx	X
CHECKED BY		DATE	REV
XXX		xxx	X
DESIGNED BY		DATE	REV
XXX		xxx	X
Material:		Aço inox AISI 316L	

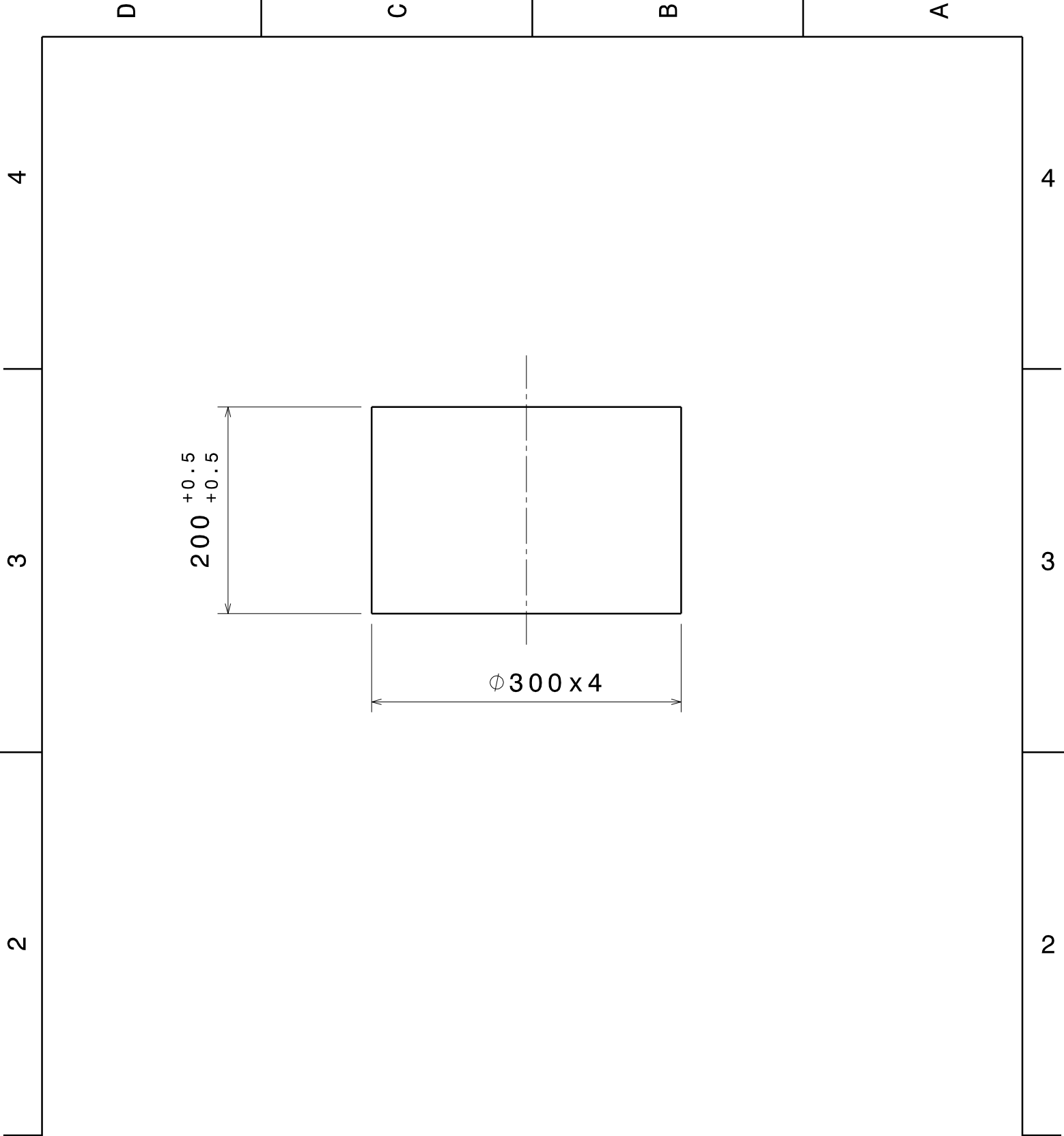




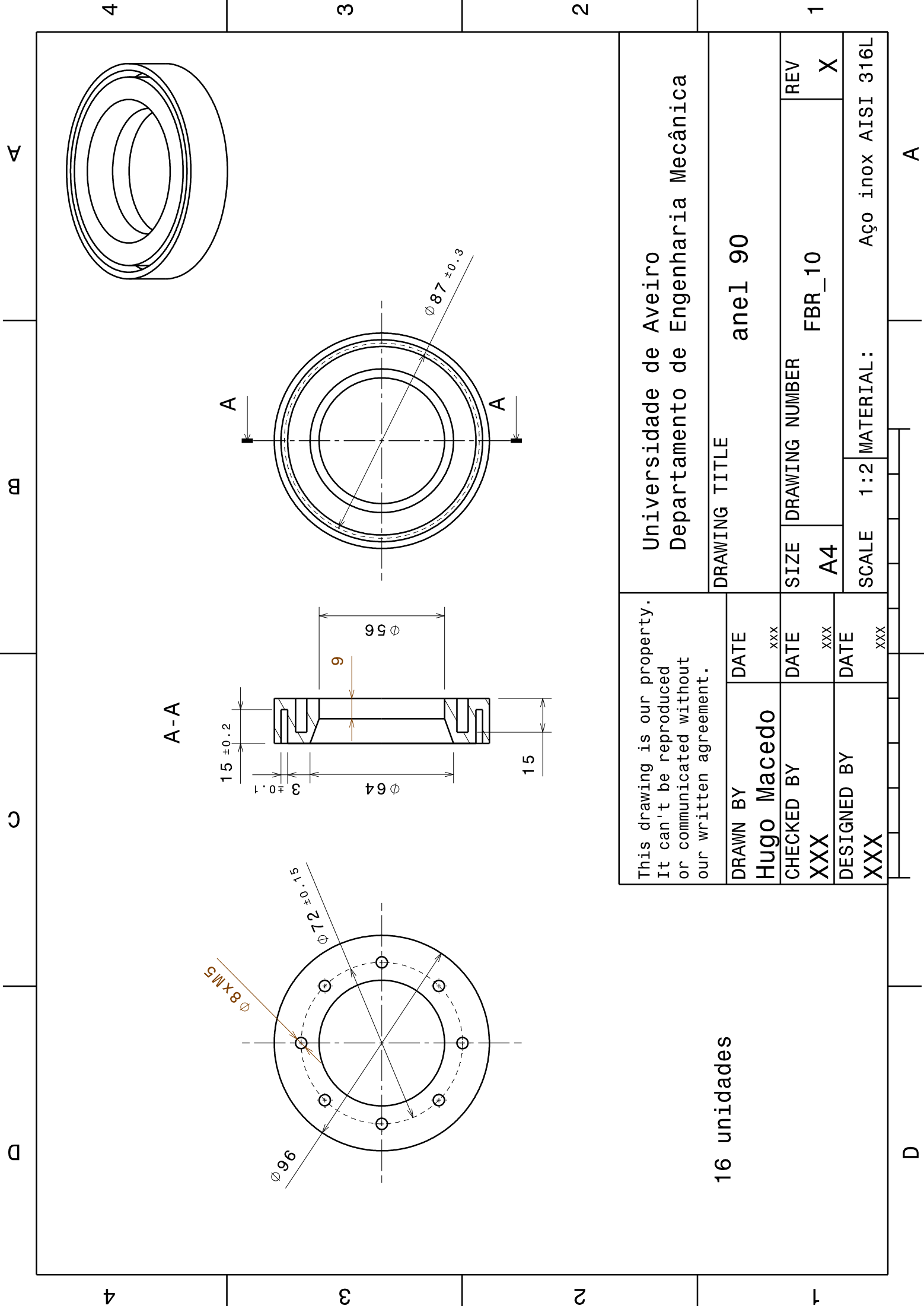
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica													
		DRAWING TITLE  Tubo acrilico D300x4													
DRAWN BY Hugo Macedo		DATE xxx													
CHECKED BY XXX		DATE xxx		SIZE A4		DRAWING NUMBER FBR 7						REV X			
DESIGNED BY XXX		DATE xxx		SCALE 1:10			MATERIAL: Acrílico								
D														A	

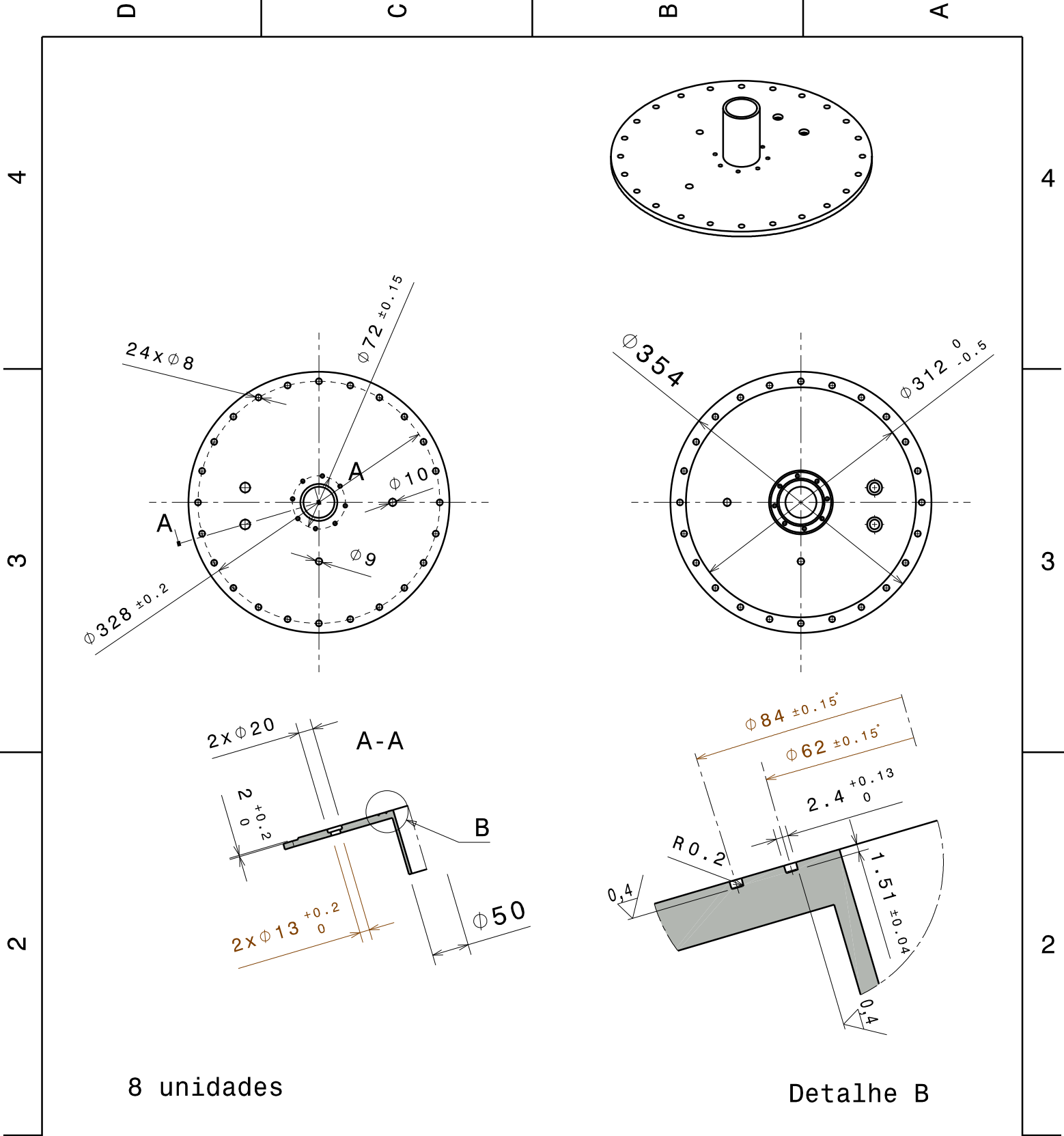


This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica			
		DRAWING TITLE			
DRAWN BY Hugo Macedo	DATE xxx	Tubo 90x4			
CHECKED BY XXX	DATE xxx	SIZE A4	DRAWING NUMBER FBR_8		REV X
DESIGNED BY XXX	DATE xxx	SCALE 1:10	MATERIAL: Acrílico		

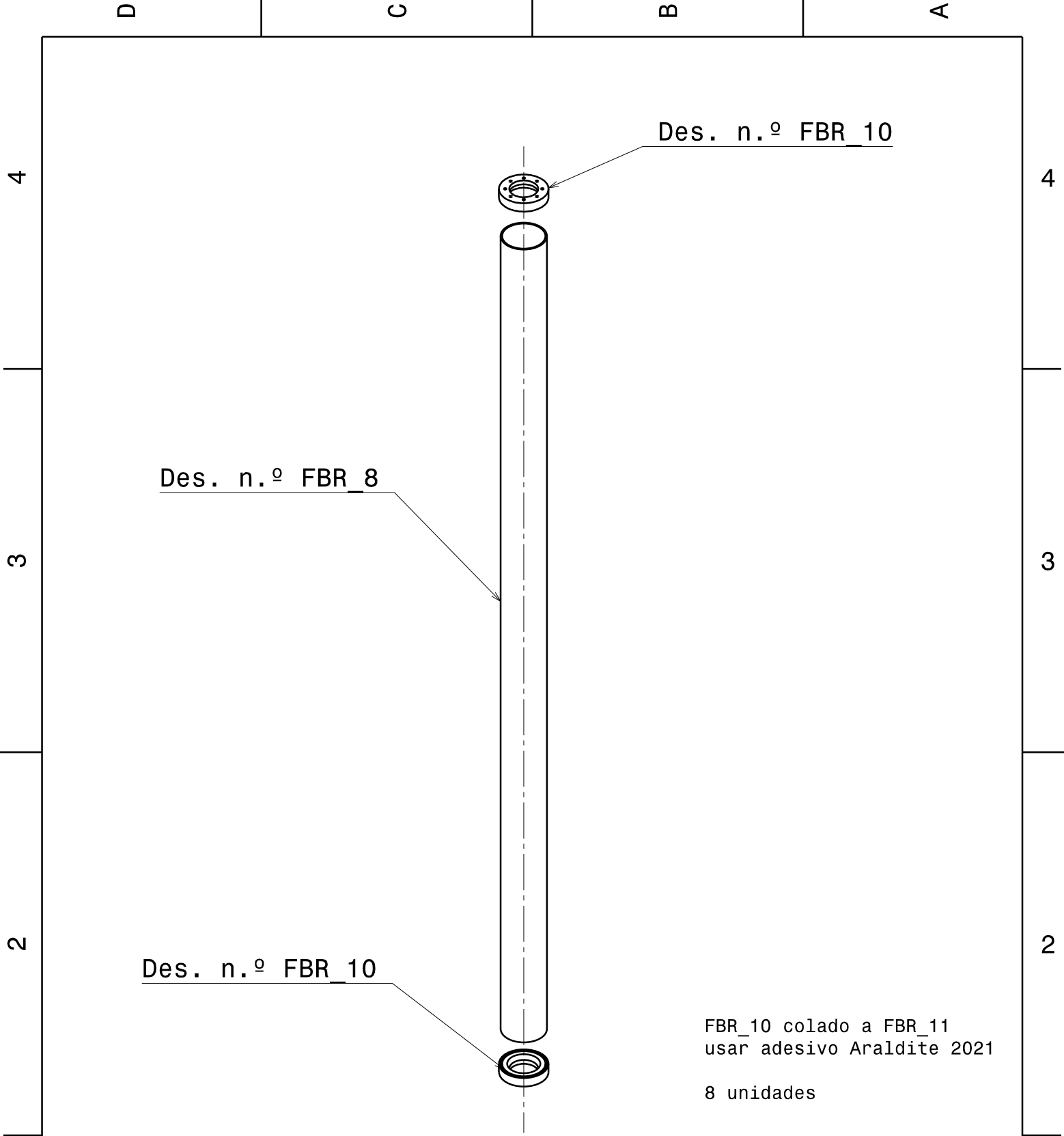


This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica			
		DRAWING TITLE			
DRAWN BY Hugo Macedo	DATE xxx	Tubo cap			
CHECKED BY XXX	DATE xxx	SIZE A4	DRAWING NUMBER FBR_9		REV X
DESIGNED BY XXX	DATE xxx	SCALE 1:5	MATERIAL: Acrílico		





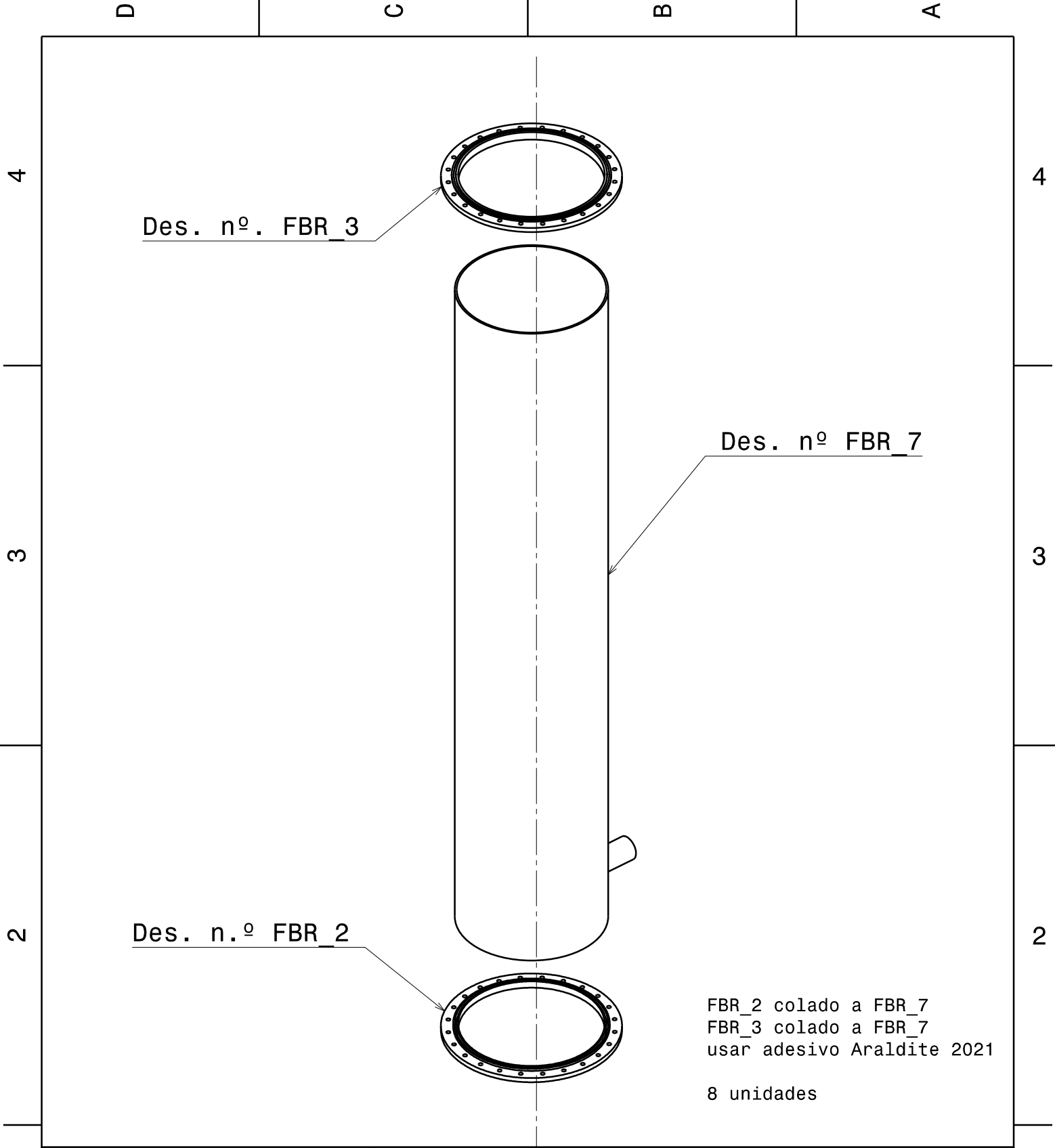
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica		
		DRAWING TITLE tampa cap		
DRAWN BY Hugo Macedo	DATE xxx	SIZE A4		
CHECKED BY XXX	DATE xxx			
DESIGNED BY XXX	DATE xxx	DRAWING NUMBER FBR_12		REV X
		SCALE 1:7	MATERIAL: Acrílico	



This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica					
		DRAWING TITLE  Assembly tubo interior					
DRAWN BY Hugo Macedo	DATE xxx	Assembly tubo interior					
CHECKED BY XXX	DATE xxx						
DESIGNED BY XXX	DATE xxx	SIZE A4	DRAWING NUMBER FBR_30			REV X	
		SCALE 1:1	WEIGHT (kg) XXX		SHEET 1 / 1		

D

A



This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica			
		DRAWING TITLE			
DRAWN BY Hugo Macedo	DATE xxx	Assembly tubo exterior			
CHECKED BY XXX	DATE xxx	SIZE A4	DRAWING NUMBER FBR_31		REV X
DESIGNED BY XXX	DATE xxx	SCALE 1:1	WEIGHT (kg) XXX	SHEET 1 / 1	

4

4

3

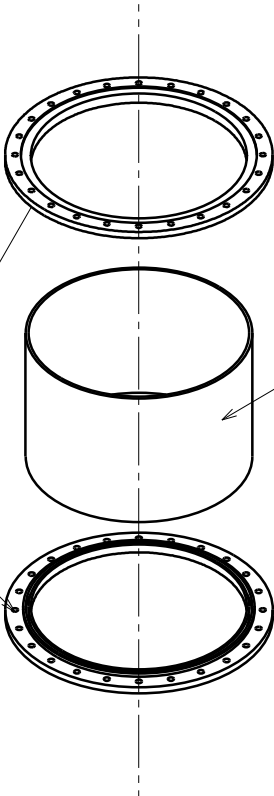
3

2

2

Des. nº. FBR\_5

Des. nº. FBR\_9



FBR\_5 colado a FBR\_8  
usar adesivo Araldite 2021  
  
8 unidades

This drawing is our property.  
It can't be reproduced  
or communicated without  
our written agreement.

Universidade de Aveiro  
Departamento de Engenharia Mecânica

DRAWING TITLE

Assembly capacete

DRAWN BY  
Hugo Macedo

DATE  
xxx

CHECKED BY  
XXX

DATE  
xxx

SIZE  
A4

DRAWING NUMBER  
FBR\_32

REV  
X

DESIGNED BY  
XXX

DATE  
xxx

SCALE 1:10

WEIGHT (kg)

XXX

SHEET 1 / 1

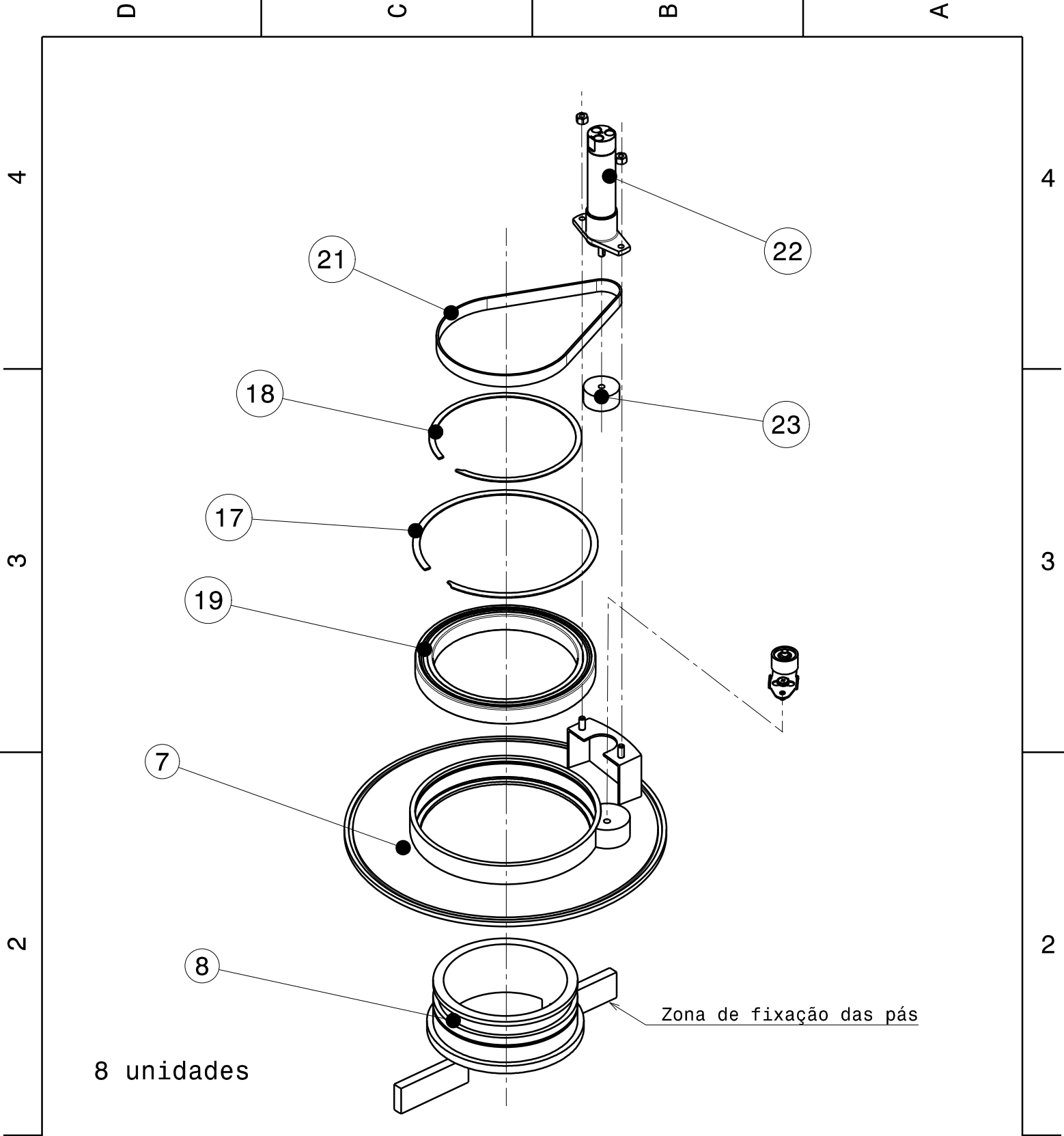
1

1

D

A





This drawing is our property.  
It can't be reproduced  
or communicated without  
our written agreement.

Universidade de Aveiro  
Departamento de Engenharia Mecânica

DRAWING TITLE

DRAWN BY  
Hugo Macedo

DATE  
xxx

Assembly Agitação

CHECKED BY  
XXX

DATE  
xxx

SIZE  
A4

DRAWING NUMBER

FBR 33

REV  
X

DESIGNED BY  
XXX

DATE  
xxx

SCALE

1:1

WEIGHT (kg)

XXX

SHEET

1 / 1

D

A

4

4

3

3

2

2

1

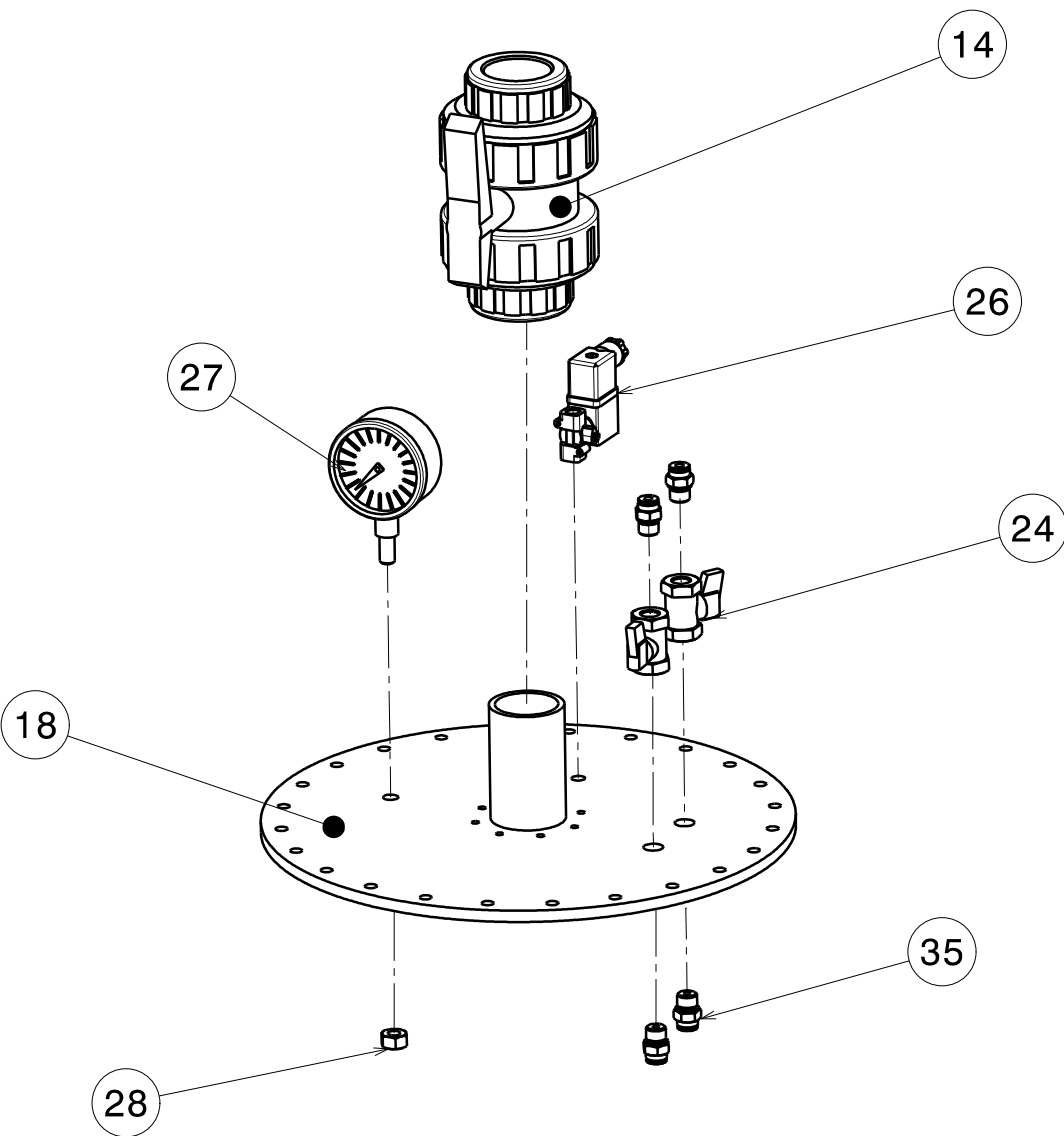
1

D

C

B

A



This drawing is our property.  
It can't be reproduced  
or communicated without  
our written agreement.

Universidade de Aveiro  
Departamento de Engenharia Mecânica

DRAWING TITLE

Assembly tampa

DRAWN BY  
Hugo Macedo

DATE  
xxx

CHECKED BY  
XXX

DATE  
xxx

DESIGNED BY  
XXX

DATE  
xxx

SIZE  
A4

DRAWING NUMBER

FBR 34

REV  
X

SCALE

1:5

WEIGHT (kg)

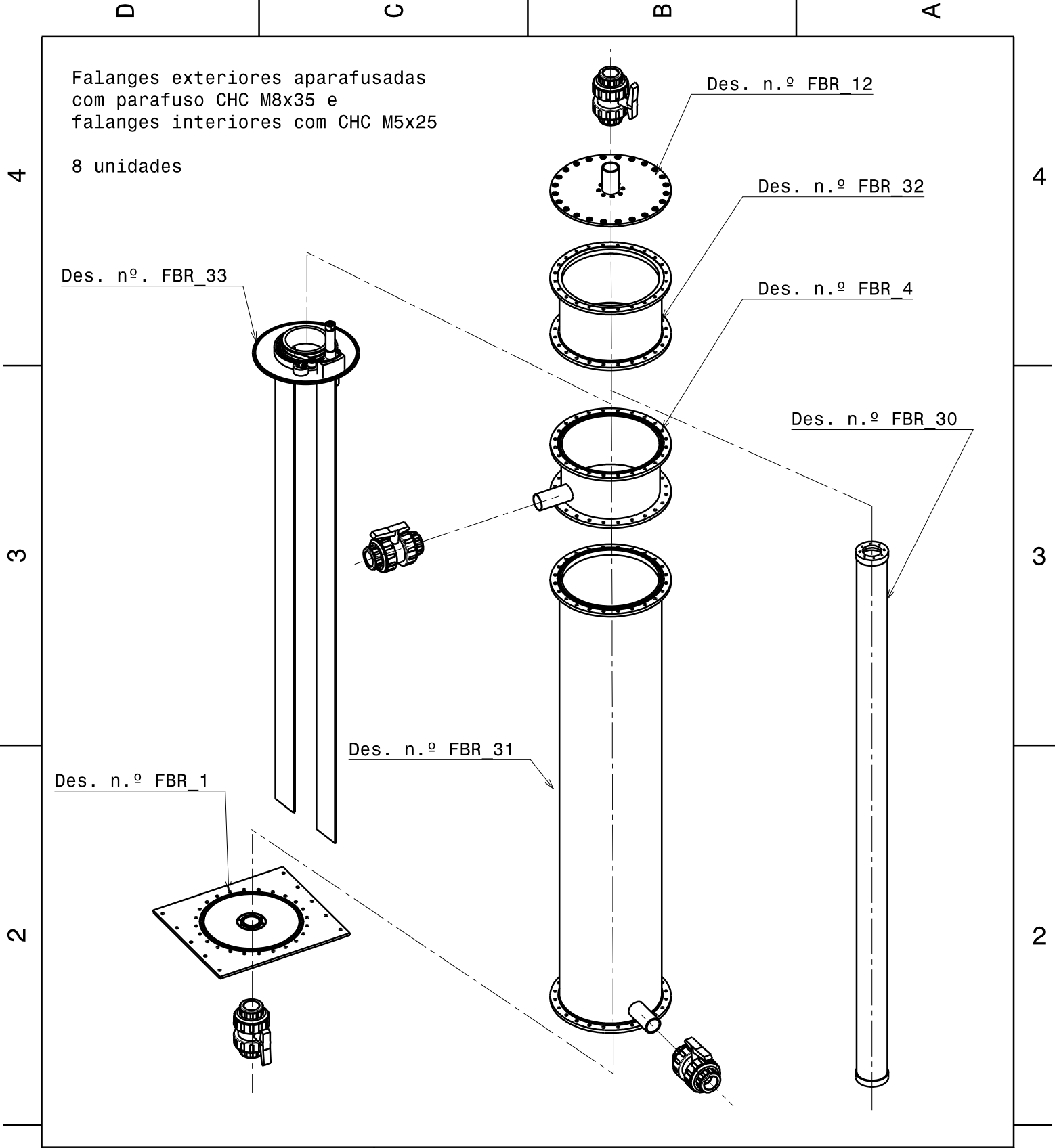
XXX

SHEET

1 / 1

D

A



This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica			
		DRAWING TITLE			
DRAWN BY Hugo Macedo	DATE xxx	Coluna			
CHECKED BY XXX	DATE xxx	SIZE A4	DRAWING NUMBER FBR_35		REV X
DESIGNED BY XXX	DATE xxx	SCALE 1:15	WEIGHT (kg) XXX	SHEET 1 / 1	

## Anexo II

Tabela 1 Anexo: Rolamento SKF 61828-2RS1

SKF

3D view

PDF

CAD

IMP

Print

Close

Deep groove ball bearings, single row

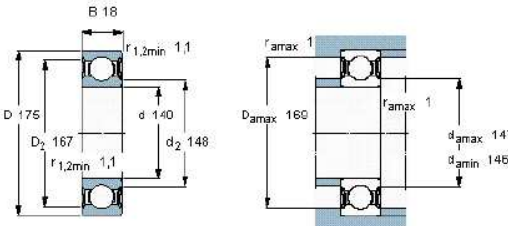
Tolerances , see also text

Radial internal clearance , see also text

Recommended fits

Shaft and housing tolerances

Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit	Speed ratings		Mass	Designation
			dynamic	static	$P_u$	Reference speed	Limiting speed		
d	D	B	C	$C_0$				kg	-
mm			kN		kN	r/min			
140	175	18	39	46,5	1,66	-	2000	0,99	61828-2RS1



Calculation factors

$k_r$  0,015

$f_0$  15

Tabela 2 Anexo: Atlas Copco, motor pneumático LZB 14RL AR005-11.

Dados do Produto à pressão de ar 6,3 bar (91 psi) Reversible

Precedente

Seguinte

Artigo Nr.	8411 0122 90	
Modelo	LZB 14RL AR005-11	
Potência máx.	0.10	kW
	0.14	hp
Velocidade à potência máx.	230	r/min
Binário à potência máx.	4.1	Nm
	3.0	lbf. ft
Binário de arranque mín.	5.0	Nm
	3.6	lbf. ft
Velocidade livre	460	r/min
Consumo de ar à potência máx.	3.6	l/s
	7.6	cmf
Peso	0.40	kg
	0.88	lb
Código de carga do eixo	a	
Isento de lubrificação	Sim	
Comment:	Stainless steel	

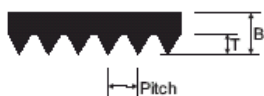


Buscar produto

Selection Tool

Biblioteca de desenhos de motores de ar pneumatiques

## 'J' & 'L' Section Poly-V Belts



	Pitch	Thickness (B)	Height (T)
'J'	2.34	3.50	1.60
'L'	4.70	7.00	3.80

### 'J' Section

Stock No.	Pitch Length	Stock No.	Pitch Length
-150J	381.0	-490J	1244.0
-160J	406.0	-500J	1270.0
-170J	432.0	-520J	1321.0
-180J	457.0	-534J	1355.0
-190J	483.0	-550J	1397.0
-200J	508.0	-562J	1428.0
-220J	559.0	-580J	1473.0
-240J	610.0	-610J	1549.0
-260J	660.0	-650J	1651.0
-280J	711.0	-690J	1752.0
-285J	723.0	-730J	1854.0
-300J	762.0	-752J	1910.0
-320J	813.0	-770J	1956.0
-340J	864.0	-785J	1992.0
-360J	914.0	-820J	2083.0
-380J	965.0	-870J	2210.0
-400J	1016.0	-920J	2337.0
-430J	1092.0	-980J	2489.0
-435J	1105.0	Standard widths of:- 4 Ribs 8 Ribs 12 Ribs 16 Ribs Off standard widths are available on request.	
-442J	1123.0		
-445J	1130.0		
-453J	1150.0		
-460J	1168.0		
-473J	1200.0		
-480J	1222.0		

200J8 = 20.0" (508mm Long), 8 Ribs

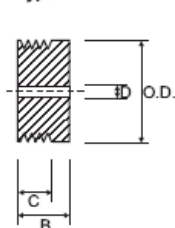
### 'L' Section

Stock No.	Pitch Length	Stock No.	Pitch Length
-500L	1270.0	1120L	2845.0
-525L	1333.0	1140L	2895.0
-540L	1371.0	1150L	2921.0
-550L	1397.0	1180L	2997.0
-560L	1422.0	1215L	3086.0
-615L	1562.0	1230L	3124.0
-635L	1613.0	1295L	3289.0
-655L	1664.0	1310L	3327.0
-675L	1715.0	1375L	3492.0
-695L	1764.0	1455L	3696.0
-710L	1803.0	1595L	4051.0
-725L	1841.0	1650L	4191.0
-765L	1943.0	1760L	4470.0
-780L	1981.0	1820L	4622.0
-795L	2020.0	1980L	5029.0
-815L	2070.0	2120L	5385.0
-825L	2096.0	2400L	6096.0
-840L	2134.0	Standard widths of:- 6 Ribs 8 Ribs 10 Ribs 12 Ribs 16 Ribs 20 Ribs Off standard widths are available on request.	
-865L	2197.0		
-880L	2235.0		
-915L	2324.0		
-930L	2362.0		
-975L	2476.0		
-990L	2515.0		
1065L	2705.0		
1080L	2743.0		

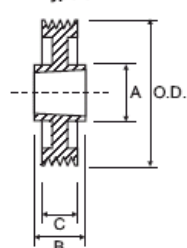
840L16 = 84.0" (2134mm Long), 16 Ribs

## 'J' Section Poly-V Pulleys 4 Groove

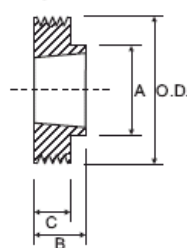
Type 1



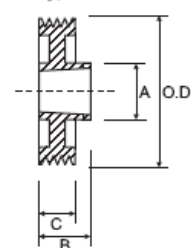
Type 6



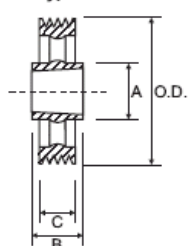
Type 7



Type 8



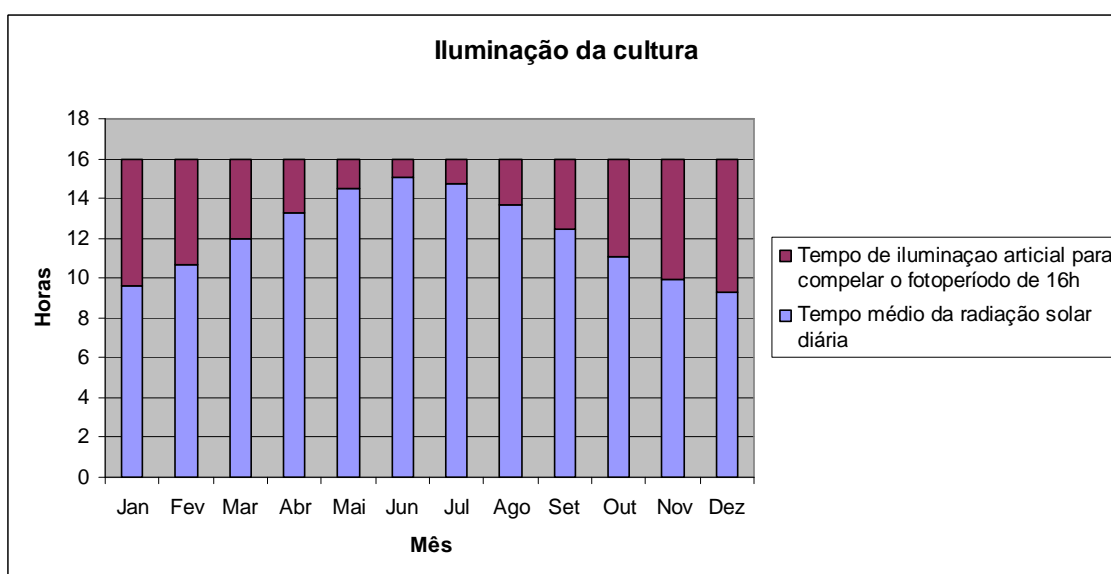
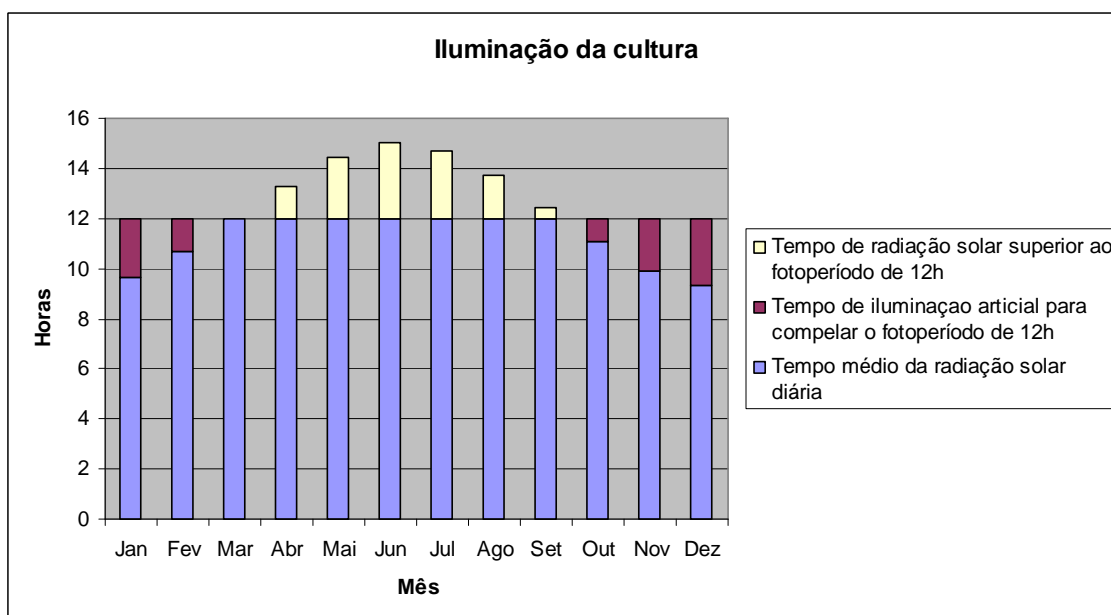
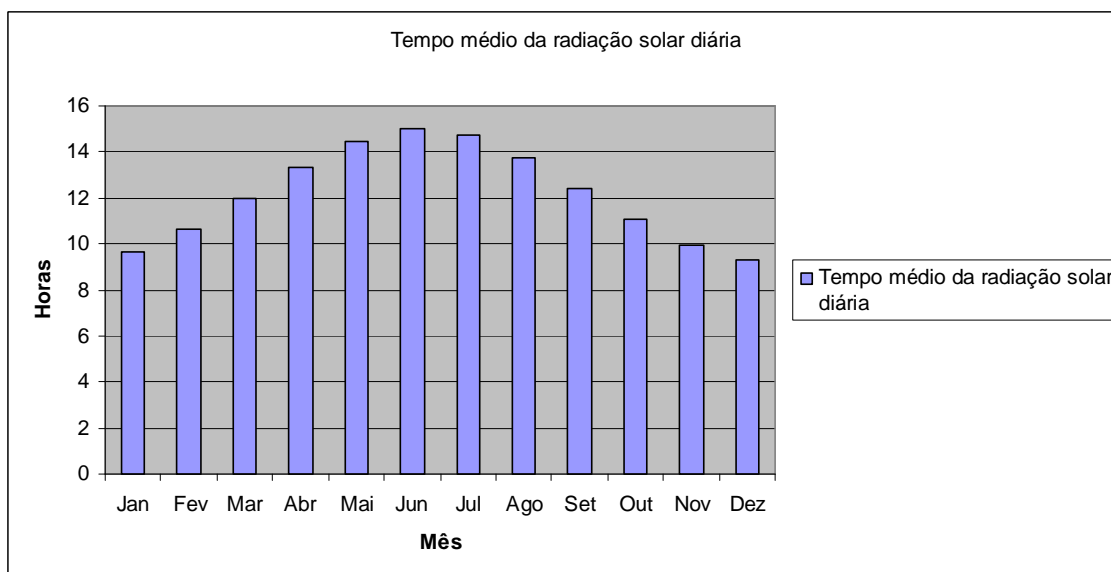
Type 9



4 Groove							4 Groove						
C = 13.5							C = 13.5						
Part No.	O.D.	Type	Bush	A	B	D	Part No.	O.D.	Type	Bush	A	B	D
PY B020J4	20.0	1	-	-	22.5	5.0	PYB100J4	100.0	7	1610	82.0	26.0	-
PY B025J4	25.0	1	-	-	22.5	5.0	PYB106J4	106.0	7	1610	88.0	26.0	-
PY B030J4	30.0	1	-	-	22.5	9.5	PYB112J4	112.0	7	1610	90.0	26.0	-
PY B035J4	35.0	1	-	-	22.5	9.5	PYB118J4	118.0	7	1610	90.0	26.0	-
PY B040J4	40.0	1	-	-	22.5	12.0	PYB125J4	125.0	8	1610	90.0	26.0	-
PY B045J4	45.0	1	-	-	22.5	12.0	PYB132J4	132.0	8	1610	90.0	26.0	-
PY B050J4	50.0	1	-	-	22.5	12.0	PYB140J4	140.0	8	1610	90.0	26.0	-
PY B056J4	56.0	7	1108	50.0	23.0	-	PYB160J4	160.0	8	2012	110.0	32.0	-
PY B060J4	60.0	7	1108	50.0	23.0	-	PYB180J4	180.0	6	2012	110.0	32.0	-
PY B063J4	63.0	7	1108	50.0	23.0	-	PYB200J4	200.0	6	2012	110.0	32.0	-
PY B067J4	67.0	7	1108	50.0	23.0	-	PYB224J4	224.0	6	2012	110.0	32.0	-
PY B071J4	71.0	7	1108	60.0	23.0	-	PYB250J4	250.0	9	2012	110.0	32.0	-
PY B075J4	75.0	7	1108	60.0	23.0	-	PYB280J4	280.0	9	2012	110.0	32.0	-
PY B080J4	80.0	7	1310	70.0	26.0	-	PYB315J4	315.0	9	2012	110.0	32.0	-
PY B085J4	85.0	7	1310	70.0	26.0	-	PYB355J4	355.0	9	2517	120.0	45.0	-
PY B090J4	90.0	7	1610	82.0	26.0	-	PYB400J4	400.0	9	2517	120.0	45.0	-
PY B095J4	95.0	7	1610	82.0	26.0	-							

## Anexo III





Lípidos 18%		ΔE (Óleo)[J/dia]			Biomassa produzida [g/dia]			Óleo extraído [g/dia]		
Mês	Q=6%	Q=8%	Q=10%	Q=6%	Q=8%	Q=10%	Q=6%	Q=8%	Q=10%	
Jan	-1,39E+07	-1,37E+07	-1,35E+07	84,54	112,72	140,90	15,22	20,29	25,36	
Fev	-1,22E+07	-1,20E+07	-1,18E+07	89,83	119,77	149,71	16,17	21,56	26,95	
Mar	-9,60E+06	-9,38E+06	-9,17E+06	95,11	126,81	158,52	17,12	22,83	28,53	
Abr	-8,31E+06	-8,02E+06	-4,99E+06	126,81	169,09	211,36	22,83	30,44	38,04	
Mai	-4,52E+06	-4,22E+06	-2,30E+06	132,10	176,13	220,16	23,78	31,70	39,63	
Jun	-2,64E+06	-2,33E+06	-9,45E+05	137,38	183,18	228,97	24,73	32,97	41,21	
Jul	-4,03E+06	-2,18E+06	-1,85E+06	147,95	197,27	246,58	26,63	35,51	44,38	
Ago	-7,74E+06	-4,81E+06	-4,49E+06	142,67	190,22	237,78	25,68	34,24	42,80	
Set	-9,86E+06	-6,42E+06	-6,17E+06	110,96	147,95	184,94	19,97	26,63	33,29	
Out	-1,18E+07	-1,16E+07	-1,14E+07	95,11	126,81	158,52	17,12	22,83	28,53	
Nov	-1,40E+07	-1,38E+07	-1,36E+07	89,83	119,77	149,71	16,17	21,56	26,95	
Dez	-1,46E+07	-1,44E+07	-1,42E+07	84,54	112,72	140,90	15,22	20,29	25,36	
Lípidos 28%										
Mês										
Jan	-1,37E+07	-1,34E+07	-1,32E+07	72,47	96,62	120,78	20,29	27,05	33,82	
Fev	-1,20E+07	-1,17E+07	-1,15E+07	76,99	102,66	128,32	21,56	28,74	35,93	
Mar	-9,38E+06	-9,09E+06	-8,81E+06	81,52	108,70	135,87	22,83	30,44	38,04	
Abr	-8,31E+06	-7,64E+06	-4,51E+06	108,70	144,93	181,16	30,44	40,58	50,73	
Mai	-4,22E+06	-3,82E+06	-1,80E+06	113,23	150,97	188,71	31,70	42,27	52,84	
Jun	-2,33E+06	-1,91E+06	-4,27E+05	117,76	157,01	196,26	32,97	43,96	54,95	
Jul	-3,69E+06	-1,74E+06	-1,29E+06	126,81	169,09	211,36	35,51	47,34	59,18	
Ago	-7,42E+06	-4,38E+06	-3,95E+06	122,28	163,05	203,81	34,24	45,65	57,07	
Set	-9,61E+06	-6,09E+06	-5,75E+06	95,11	126,81	158,52	26,63	35,51	44,38	
Out	-1,16E+07	-1,13E+07	-1,10E+07	81,52	108,70	135,87	22,83	30,44	38,04	
Nov	-1,38E+07	-1,32E+07	-1,33E+07	76,99	102,66	128,32	21,56	28,74	35,93	
Dez	-1,44E+07	-1,41E+07	-1,39E+07	72,47	96,62	120,78	20,29	27,05	33,82	
Lípidos 40%										
Mês										
Jan	-1,34E+07	-1,31E+07	-1,28E+07	66,16	88,22	110,27	26,47	35,29	44,11	
Fev	-1,18E+07	-1,14E+07	-1,11E+07	70,30	93,73	117,16	28,12	37,49	46,87	
Mar	-9,12E+06	-8,74E+06	-8,37E+06	74,43	99,25	124,06	29,77	39,70	49,62	
Abr	-8,02E+06	-7,18E+06	-3,93E+06	99,25	132,33	165,41	39,70	52,93	66,16	
Mai	-3,85E+06	-3,34E+06	-1,19E+06	103,38	137,84	172,30	41,35	55,14	68,92	
Jun	-1,95E+06	-1,41E+06	2,04E+05	107,52	143,35	179,19	43,01	57,34	71,68	
Jul	-3,29E+06	-1,19E+06	-6,13E+05	115,79	154,38	192,98	46,31	61,75	77,19	
Ago	-7,03E+06	-3,85E+06	-3,29E+06	111,65	148,87	186,09	44,66	59,55	74,43	
Set	-9,30E+06	-5,68E+06	-5,24E+06	86,84	115,79	144,73	34,74	46,31	57,89	
Out	-1,14E+07	-1,10E+07	-1,06E+07	74,43	99,25	124,06	29,77	39,70	49,62	
Nov	-1,36E+07	-1,28E+07	-1,29E+07	70,30	93,73	117,16	28,12	37,49	46,87	
Dez	-1,41E+07	-1,38E+07	-1,35E+07	66,16	88,22	110,27	26,47	35,29	44,11	
Lípidos 58%										
Jan	-1,32E+07	-1,28E+07	-1,24E+07	54,35	72,47	90,58	31,52	42,03	52,54	
Fev	-1,16E+07	-1,11E+07	-1,07E+07	57,75	76,99	96,24	33,49	44,66	55,82	
Mar	-8,90E+06	-8,46E+06	-8,01E+06	61,14	81,52	101,90	35,46	47,28	59,10	
Abr	-7,67E+06	-6,79E+06	-3,45E+06	81,52	108,70	135,87	47,28	63,04	78,81	
Mai	-3,56E+06	-2,94E+06	-6,95E+05	84,92	113,23	141,53	49,25	65,67	82,09	
Jun	-1,64E+06	-9,95E+05	7,20E+05	88,32	117,76	147,19	51,22	68,30	85,37	
Jul	-2,95E+06	-7,50E+05	-5,69E+04	95,11	126,81	158,52	55,16	73,55	91,94	
Ago	-6,71E+06	-3,43E+06	-2,76E+06	91,71	122,28	152,86	53,19	70,93	88,66	
Set	-9,05E+06	-5,35E+06	-4,83E+06	71,33	95,11	118,89	41,37	55,16	68,95	
Out	-1,11E+07	-1,07E+07	-1,03E+07	61,14	81,52	101,90	35,46	47,28	59,10	
Nov	-1,34E+07	-1,24E+07	-1,25E+07	57,75	76,99	96,24	33,49	44,66	55,82	
Dez	-1,39E+07	-1,35E+07	-1,31E+07	54,35	72,47	90,58	31,52	42,03	52,54	

Lípidos 18%		ΔE (Óleo)[J/dia]			Biomassa produzida [g/dia]			Óleo extraído [g/dia]		
Mês	Q=6%	Q=8%	Q=10%	Q=6%	Q=8%	Q=10%	Q=6%	Q=8%	Q=10%	
Jan	-4,94E+06	-4,79E+06	-4,65E+06	63,41	84,54	105,68	11,41	15,22	19,02	
Fev	-2,74E+06	-2,59E+06	-2,44E+06	67,37	89,83	112,28	12,13	16,17	20,21	
Mar	4,33E+05	5,94E+05	7,56E+05	71,33	95,11	118,89	12,84	17,12	21,40	
Abr	6,45E+05	8,61E+05	1,08E+06	95,11	126,81	158,52	17,12	22,83	28,53	
Mai	6,72E+05	8,96E+05	1,12E+06	99,07	132,10	165,12	17,83	23,78	29,72	
Jun	6,99E+05	9,32E+05	1,17E+06	103,04	137,38	171,73	18,55	24,73	30,91	
Jul	7,53E+05	1,00E+06	1,25E+06	110,96	147,95	184,94	19,97	26,63	33,29	
Ago	7,26E+05	9,68E+05	1,21E+06	107,00	142,67	178,33	19,26	25,68	32,10	
Set	5,65E+05	7,53E+05	9,41E+05	83,22	110,96	138,70	14,98	19,97	24,97	
Out	-1,81E+06	-1,65E+06	-1,49E+06	71,33	95,11	118,89	12,84	17,12	21,40	
Nov	-4,55E+06	-4,40E+06	-4,24E+06	67,37	89,83	112,28	12,13	16,17	20,21	
Dez	-5,64E+06	-5,50E+06	-5,35E+06	63,41	84,54	105,68	11,41	15,22	19,02	
Lípidos 28%										
Mês										
Jan	-4,79E+06	-4,60E+06	-4,41E+06	54,35	72,47	90,58	15,22	20,29	25,36	
Fev	-2,59E+06	-2,39E+06	-2,18E+06	57,75	76,99	96,24	16,17	21,56	26,95	
Mar	5,94E+05	8,10E+05	1,02E+06	61,14	81,52	101,90	17,12	22,83	28,53	
Abr	8,61E+05	1,15E+06	1,43E+06	81,52	108,70	135,87	22,83	30,44	38,04	
Mai	8,96E+05	1,20E+06	1,49E+06	84,92	113,23	141,53	23,78	31,70	39,63	
Jun	9,32E+05	1,24E+06	1,55E+06	88,32	117,76	147,19	24,73	32,97	41,21	
Jul	1,00E+06	1,34E+06	1,67E+06	95,11	126,81	158,52	26,63	35,51	44,38	
Ago	9,68E+05	1,29E+06	1,61E+06	91,71	122,28	152,86	25,68	34,24	42,80	
Set	7,53E+05	1,00E+06	1,25E+06	71,33	95,11	118,89	19,97	26,63	33,29	
Out	-1,65E+06	-1,43E+06	-1,22E+06	61,14	81,52	101,90	17,12	22,83	28,53	
Nov	-4,40E+06	-4,41E+06	-3,99E+06	57,75	76,99	96,24	16,17	21,56	26,95	
Dez	-5,50E+06	-5,30E+06	-5,11E+06	54,35	72,47	90,58	15,22	20,29	25,36	
Lípidos 40%										
Mês										
Jan	-4,62E+06	-4,37E+06	-4,12E+06	49,62	66,16	82,70	19,85	26,47	33,08	
Fev	-2,40E+06	-2,14E+06	-1,87E+06	52,72	70,30	87,87	21,09	28,12	35,15	
Mar	7,91E+05	1,07E+06	1,35E+06	55,83	74,43	93,04	22,33	29,77	37,22	
Abr	1,12E+06	1,50E+06	1,87E+06	74,43	99,25	124,06	29,77	39,70	49,62	
Mai	1,17E+06	1,56E+06	1,95E+06	77,54	103,38	129,23	31,01	41,35	51,69	
Jun	1,22E+06	1,62E+06	2,03E+06	80,64	107,52	134,40	32,25	43,01	53,76	
Jul	1,31E+06	1,75E+06	2,18E+06	86,84	115,79	144,73	34,74	46,31	57,89	
Ago	1,26E+06	1,68E+06	2,10E+06	83,74	111,65	139,56	33,50	44,66	55,83	
Set	9,82E+05	1,31E+06	1,64E+06	65,13	86,84	108,55	26,05	34,74	43,42	
Out	-1,45E+06	-1,17E+06	-8,90E+05	55,83	74,43	93,04	22,33	29,77	37,22	
Nov	-4,21E+06	-4,12E+06	-3,68E+06	52,72	70,30	87,87	21,09	28,12	35,15	
Dez	-5,32E+06	-5,07E+06	-4,82E+06	49,62	66,16	82,70	19,85	26,47	33,08	
Lípidos 58%										
Jan	-4,48E+06	-4,18E+06	-3,88E+06	40,76	54,35	67,94	23,64	31,52	39,40	
Fev	-2,25E+06	-1,94E+06	-1,62E+06	43,31	57,75	72,18	25,12	33,49	41,87	
Mar	9,52E+05	1,29E+06	1,62E+06	45,86	61,14	76,43	26,60	35,46	44,33	
Abr	1,34E+06	1,78E+06	2,23E+06	61,14	81,52	101,90	35,46	47,28	59,10	
Mai	1,39E+06	1,86E+06	2,32E+06	63,69	84,92	106,15	36,94	49,25	61,57	
Jun	1,45E+06	1,93E+06	2,41E+06	66,24	88,32	110,40	38,42	51,22	64,03	
Jul	1,56E+06	2,08E+06	2,60E+06	71,33	95,11	118,89	41,37	55,16	68,95	
Ago	1,50E+06	2,01E+06	2,51E+06	68,79	91,71	114,64	39,90	53,19	66,49	
Set	1,17E+06	1,56E+06	1,95E+06	53,50	71,33	89,17	31,03	41,37	51,72	
Out	-1,29E+06	-9,56E+05	-6,22E+05	45,86	61,14	76,43	26,60	35,46	44,33	
Nov	-4,06E+06	-3,88E+06	-3,43E+06	43,31	57,75	72,18	25,12	33,49	41,87	
Dez	-5,18E+06	-4,88E+06	-4,58E+06	40,76	54,35	67,94	23,64	31,52	39,40	

Apenas iluminação artificial

Q=6%		$\Delta E$ (Óleo)[J/dia]			
Mês	Lípidos 18%	Lípidos 28%	Lípidos 40%	Lípidos 58%	
Jan	3,45E+05	4,60E+05	6,01E+05	7,15E+05	
Fev	4,07E+05	5,42E+05	7,07E+05	8,42E+05	
Mar	4,83E+05	6,44E+05	8,40E+05	1,00E+06	
Abr	7,15E+05	9,54E+05	1,24E+06	1,48E+06	
Mai	8,11E+05	1,08E+06	1,41E+06	1,68E+06	
Jun	8,76E+05	1,17E+06	1,52E+06	1,81E+06	
Jul	9,24E+05	1,23E+06	1,61E+06	1,91E+06	
Ago	8,30E+05	1,11E+06	1,44E+06	1,72E+06	
Set	5,85E+05	7,80E+05	1,02E+06	1,21E+06	
Out	4,48E+05	5,97E+05	7,79E+05	9,28E+05	
Nov	3,78E+05	5,04E+05	6,57E+05	7,83E+05	
Dez	3,34E+05	4,46E+05	5,81E+05	6,92E+05	
		Peso seco [g/dia]			
Mês	Lípidos 18%	Lípidos 28%	Lípidos 40%	Lípidos 58%	
Jan	50,88	43,61	39,82	32,71	
Fev	59,90	51,35	46,88	38,51	
Mar	71,21	61,04	55,73	45,78	
Abr	105,41	90,35	82,50	67,77	
Mai	119,47	102,40	93,50	76,80	
Jun	129,05	110,62	101,00	82,96	
Jul	136,21	116,75	106,60	87,56	
Ago	122,34	104,86	95,74	78,64	
Set	86,20	73,89	67,46	55,42	
Out	65,98	56,56	51,64	42,42	
Nov	55,69	47,74	43,59	35,80	
Dez	49,25	42,21	38,54	31,66	
		Óleo [g/dia]			
Mês	18%	28%	40%	58%	
Jan	9,16	12,21	15,93	18,97	
Fev	10,78	14,38	18,75	22,34	
Mar	12,82	17,09	22,29	26,55	
Abr	18,97	25,30	33,00	39,30	
Mai	21,50	28,67	37,40	44,54	
Jun	23,23	30,97	40,40	48,12	
Jul	24,52	32,69	42,64	50,79	
Ago	22,02	29,36	38,30	45,61	
Set	15,52	20,69	26,99	32,14	
Out	11,88	15,84	20,66	24,60	
Nov	10,02	13,37	17,43	20,77	
Dez	8,86	11,82	15,42	18,36	